
DIPLOMARBEIT

Ing.
Manfred Kurt Nußbaumer

**Untersuchung der Effizienz von
Hybridantrieben**

Klein-Pöchlarn, 2013

DIPLOMARBEIT

Untersuchung der Effizienz von Hybridantrieben

Autor:

Ing. Manfred Kurt Nußbaumer

Studiengang:

Informationstechnik

Seminargruppe:

KI08w2wNA

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Rolf Hiersemann

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. Günter Hopf

Einreichung:

Mittweida, 15.07.2013

Verteidigung / Bewertung:

Mittweida, 2013

DIPLOMA THESIS

Analysis of the efficiency of hybrid drives

author:

Ing. Manfred Kurt Nußbaumer

course of studies:

information technology

seminar group:

KI08w2wNA

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Rolf Hiersemann

second examiner:

Dipl.-Ing. Günter Hopf

submission:

Mittweida, 15.07.2013

defence / evaluation:

Mittweida, 2013

Bibliografische Angaben:

Nußbaumer, Manfred Kurt:

Untersuchung der Effizienz von Hybridantrieben. – 2013. – VIII, 101, XVIII S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Elektro- und Informationstechnik,
Diplomarbeit, 2013

Referat:

Firmen arbeiten hauptsächlich mit Staplern um ihre Waren zu lagern und zu transportieren. Zum Einsatz kommen vor allem Elektrostapler, Dieselstapler und Hybridstapler. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Vergleich zweier Hybridantriebe anhand eines autonomen Robotermodells, dessen Antrieb dem eines Staplers nachgebildet wurde. Ergänzend zu den existierenden Hybridantrieben, unterzog man den modifizierten Antrieb einer Tauglichkeitsprüfung. Dadurch entstand ein neues Konzept. Anhand von Wirkungsgradberechnungen der beiden Hybridantriebe, eingeschlossen dem Elektroantrieb und der anschließenden Untersuchung der Effizienz, wird die Frage geklärt, ob der modifizierte Antrieb in der Praxis zum Einsatz kommen könnte und eine Bereicherung für die Industrie wäre.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen meinen Dank aussprechen, die zur Entstehung der vorliegenden Diplomarbeit beigetragen haben.

Herzlichen Dank an die Berater der Firma Still, die mich in die Staplertechnologie eingeweiht haben. Besonders hervorheben möchte ich meinen Ansprechpartner Herrn Aringer, der mir jederzeit bei Fragen und Anliegen zur Verfügung stand.

Herrn Professor Dr.-Ing. Rolf Hiersemann danke ich für die Betreuung meiner Diplomarbeit, und der wertvollen Ratschläge, die er mir stets gab. Besonderer Dank gilt meinem Diplomarbeitsbetreuer Herrn Dipl.-Ing. Günter Hopf für die fachkundige Unterstützung während des Diplomarbeitsprozesses.

Ferner danke ich meinen Kommilitonen Stephan Georg Traxler, Thomas Tiefenbacher und Markus Meixner, die stets ein offenes Ohr für mich hatten und mich während der Diplomarbeitsphase unterstützt haben.

Weiteres bedanke ich mich bei meiner Familie und Verwandtschaft für die Unterstützung während der Diplomarbeitsphase. Vor allem danke ich meiner Oma Ludmilla Dorner und meiner Mutter Kornelia Aouadi, die mir in der gesamten Studienzeit emotionalen Beistand geleistet haben.

Ein sehr großer Dank gilt meiner Lebensgefährtin Maria Köck, die immer für mich da war.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand von Wissenschaft und Technik	5
2.1 Verbrennungsbetriebene Fahrzeuge	5
2.1.1 Dieselmotor	5
2.1.2 Ottomotor	6
2.2 Elektrobetriebene Fahrzeuge	7
2.2.1 Elektromotor.....	7
2.2.2 Batterietechnologie.....	8
2.2.2.1 Nickel-Metallhydrid-Batterie.....	10
2.2.2.2 Lithium-Ionen-Batterie	11
2.2.2.3 Blei-Säure-Batterie	11
2.3 Hybridfahrzeuge.....	12
2.3.1 Entwicklungsgeschichte des Hybrides.....	12
2.3.2 Arten von Hybridantrieben.....	13
2.3.2.1 Gliederung nach Leistung.....	13
2.3.2.2 Gliederung nach Aufbau.....	16
2.3.3 Betriebsarten.....	19
2.3.3.1 Elektrisch fahren.....	19
2.3.3.2 Generatorbetrieb	19
2.3.3.3 Normalbetrieb.....	20
2.3.3.4 Boosten	20
2.3.3.5 Rekuperation.....	21
2.3.3.6 Segeln	22
2.3.3.7 Start/Stopp	22

3	Präzisierung der Aufgabenstellung	23
3.1	<i>Ausgangssituation Stapler</i>	23
3.1.1	Elektrostapler	23
3.1.2	Hybridstapler	24
3.2	<i>Nachbau im Modellbau</i>	27
3.2.1	Elektromodell	27
3.2.2	Hybridmodell	29
3.2.3	Modifizierte Version des Hybridmodells	30
4	Systemkonzept.....	33
4.1	<i>Wirkungsgradgegenüberstellung.....</i>	33
4.1.1	Elektromodell	33
4.1.2	Hybridmodell	34
4.1.3	Modifizierte Version des Hybridmodells	35
4.2	<i>Vor- und Nachteile</i>	37
4.2.1	Elektromodell	37
4.2.2	Hybridmodell	38
4.2.3	Modifizierte Version des Hybridmodells	38
4.2.4	Konklusion	39
5	Systementwicklung.....	41
5.1	<i>Hardwareentwicklung.....</i>	41
5.1.1	Mechanischer Aufbau	41
5.1.1.1	Grundmodell	41
5.1.1.2	Erste Umbauphase	41
5.1.1.3	Zweite Umbauphase	43
5.1.1.4	Prüfstand	46
5.1.2	Elektronikentwurf	47
5.1.2.1	Elektromodell	47
5.1.2.2	Hybridmodell	47
5.1.2.3	Modifizierte Version des Hybridmodells	48
5.2	<i>Softwareentwicklung</i>	51
5.2.1	Elektromodell	51
5.2.2	Hybridmodell	52
5.2.3	Modifizierte Version des Hybridmodells	53
6	Funktionsnachweis.....	61
6.1	<i>Auswertung der Elektromodellergebnisse</i>	61
6.2	<i>Auswertung der Hybridmodellergebnisse</i>	66
6.3	<i>Auswertung der Ergebnisse der modifizierten Version des Hybridmodells</i>	71

6.4	<i>Problematik der modifizierten Version des Hybridmodells</i>	77
7	Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick	81
7.1	<i>Nutzungsmöglichkeiten</i>	91
7.2	<i>Weiterentwicklungsmöglichkeiten</i>	91
Index	93	
Literatur	95	
Anlagen	101	
Anlagen, Hybridmodell	I	
Anlagen, Modifizierte Version des Hybridmodells	III	
Selbstständigkeitserklärung		

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: KFZ Bestand in Österreich	1
Abbildung 2: Mineralölverbrauch weltweit	2
Abbildung 3: Akkuvergleich der verschiedenen Akkutypen	9
Abbildung 4: Übersicht der Hybridklassen nach elektrischer Leistung.....	13
Abbildung 5: Fahrspiel eines Hybridfahrzeuges	15
Abbildung 6: Serieller Hybridantrieb	17
Abbildung 7: Paralleler Hybridantrieb	18
Abbildung 8: Leistungsverzweigter Hybridantrieb.....	18
Abbildung 9: Serieller Hybridantrieb – Elektrisch fahren.....	19
Abbildung 10: Serieller Hybridantrieb – Generatorbetrieb	20
Abbildung 11: Serieller Hybridantrieb – Boosten	21
Abbildung 12: Serieller Hybridantrieb – Rekuperation	21
Abbildung 13: Elektro-Gabelstapler RX 60	23
Abbildung 14: Dieseltreibender Hybrid-Gabelstapler RX 70	25
Abbildung 15: Derzeitiger Hybridantrieb Firma Still	26
Abbildung 16: Antrieb des Elektromodells	27
Abbildung 17: RP6 Basis Modell	28
Abbildung 18: Antrieb des Hybridmodells.....	29
Abbildung 19: Antrieb des modifizierten Hybridmodells.....	30
Abbildung 20: Wirkungsgrad Betrieb Elektromodell.....	33

Abbildungsverzeichnis	V
Abbildung 21: Wirkungsgrad Blei-Säure Akkuladung.....	34
Abbildung 22: Wirkungsgrad Betrieb Hybridmodell.....	34
Abbildung 23: Wirkungsgrad Normalbetrieb Mod. V. Hybrid	35
Abbildung 24: Wirkungsgrad VM-Betrieb Mod. V. Hybrid.....	35
Abbildung 25: Wirkungsgrad LiPo Akkuladung	36
Abbildung 26: Wirkungsgrad NiMH Akkuladung	36
Abbildung 27: Wirkungsgrad VM-Ladung Mod. V. Hybrid	37
Abbildung 28: Modifizierte Hybridschaltung	40
Abbildung 29: Aufbau der ersten Umbauphase	43
Abbildung 30: Seitenansicht des Entwurfsmodells der zweiten Umbauphase.....	44
Abbildung 31: Hybridaufbau zweite Umbauphase – seitliche Ansicht	45
Abbildung 32: Schwingungsdämpfer mit Distanzbolzen	45
Abbildung 33: Hybridaufbau zweite Umbauphase – vordere Ansicht.....	45
Abbildung 34: Prüfstand	46
Abbildung 35: Prüfstand mit RP6.....	46
Abbildung 36: Zentrierkupplung.....	47
Abbildung 37: M128 Erweiterungssatz	48
Abbildung 40: RP6 Remotrol 1.3	52
Abbildung 43: C-Control Pro IDE Selbsttest	53
Abbildung 44: Ablaufdiagramm Gesamtübersicht.....	54
Abbildung 45: Ablaufdiagramm VM-Start.....	55
Abbildung 46: Ablaufdiagramm VM-Start Fortsetzung	56
Abbildung 47: Ablaufdiagramm VM-Betrieb	57

Abbildung 48: Ablaufdiagramm VM-Betrieb Fortsetzung	58
Abbildung 49: Ablaufdiagramm VM-Stopp.....	59
Abbildung 50: RP6 Remotrol 1.3 Starteinstellungen.....	61
Abbildung 51: RP6 Remotrol 1.3 Terminal	62
Abbildung 52: Akkuspannung Elektromodell	63
Abbildung 53: Drehzahlen Elektromodell	64
Abbildung 54: Motorströme Elektromodell.....	65
Abbildung 55: Spannungen Hybridmodell	67
Abbildung 56: Drehzahlen Hybridmodell	68
Abbildung 57: Motorströme Hybridmodell	69
Abbildung 58: Temperatur Hybridmodell	70
Abbildung 59: Ladetest mit dem Ladegerät.....	71
Abbildung 60: Ladetest mit dem NiMH Laderegler	72
Abbildung 61: Akkuspannung Elektromodell – Aufladung über Laderegler	74
Abbildung 62: Drehzahlen Elektromodell - Aufladung über Laderegler.....	75
Abbildung 63: Motorströme Elektromodell - Aufladung über Laderegler.....	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile eines Dieselmotors	6
Tabelle 2: Vor- und Nachteile des Ottomotors	7
Tabelle 3: Vor- und Nachteile des Elektromotors.....	8
Tabelle 4: Betriebsarten/Zwischenzustände modifizierte Hybridversion.....	39
Tabelle 5: Temperaturbereiche für Akku, Transistor und MAX712.....	73
Tabelle 6: Wertetabelle für PTC KTY81-110	79
Tabelle 7: Herstellerangaben und Vergleichswerte der Fahrzeuge und deren Komponenten.....	83
Tabelle 8: Gemessene Werte für die Berechnung der Fahrzeugdaten	84
Tabelle 9: Angenommene Werte für die Berechnung der Fahrzeugdaten	85
Tabelle 10: Ergebnisse des Elektrostaplers RX60-35.....	86
Tabelle 11: Ergebnisse des Elektromodells RP6	86
Tabelle 12: Ergebnisse des Hybridstaplers RX70-35.....	87
Tabelle 13: Ergebnisse des Hybridmodells.....	87
Tabelle 14: Theoretische Ergebnisse der mod. Version des Hybridmodells im Normalbetrieb.....	88
Tabelle 15: Theoretische Ergebnisse der mod. Version des Hybridmodells im VM-Betrieb	89
Tabelle 16: Theor. Ergebnisse des Elektromodells RP6 bei einer Schnellladung	90
Tabelle 17: Theor. Ergebnisse der mod. Version des Hybridmodells bei einer Schnellladung.....	90

Abkürzungsverzeichnis

KFZ	K raft f ahrzeug
PKW	P ersonen k raft w agen
Kombi	K ombinationskraftwagen
Mrd	M illiarden
OPEC	O rganization of the P etroleum E xporting C ountries
t	T onnen
NiCd Akku	N ickel C admium A kkumulator
NiMH Akku	N ickel M etallhydrid A kkumulator
NiMH LSD	N ickel M etallhydrid low s elf- d ischarge
Lilon Akku	L ithium I onen A kkumulator
LiPo Akku	L ithium P olymer A kkumulator
I²C	I nter- I ntegrated C ircuit
LED	licht- e mittierende- D iode
LCD	liquid crystal d isplay
kW	K ilowatt
kg	K ilogramm
VM	V erbrennungs m otor
PC	P ersonal C omputer
ADC	A nalog to d igital converter
arb.u.	A rbitrary unit
ISG	I ntegrated S tarter G enerator
BAS	B elt A lternator S tarter
NOX	N itrogen O xide

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die weltweite Nachfrage nach Mobilität wird in den kommenden Jahrzehnten, trotz gelegentlicher Absatzprobleme, stark zunehmen. „Bei der Betrachtung der Entwicklung des KFZ-Bestandes in Österreich fällt besonders der überdurchschnittlich hohe Zuwachs an PKW und Kombi (+451 % von 1965 bis 2009), gemessen an der Zunahme des gesamten KFZ-Bestandes [...] (+230 % von 1965 bis 2009), auf [!]. In den späten 60er und frühen 70er Jahren waren die größten Zuwachsraten zu verzeichnen, die jedoch in Folge der ersten [!] und zweiten [!] Ölkrise [in den Jahren] 1973 und 1980 [!] gedämpft wurden. In der ersten Hälfte der 90er Jahre kam es erneut zu einem Anstieg der Zuwachsraten. Im Zeitraum von 2005 bis 2009 flachten die Zuwachsraten wieder deutlich ab (ca. 1 % - 2 % jährliche Steigerungsrate).“ (BMVIT, 2011) S.73

In Abbildung 1 sieht man den Entwicklungstrend von dieselbetriebenen als auch benzinbetriebenen Fahrzeugen.

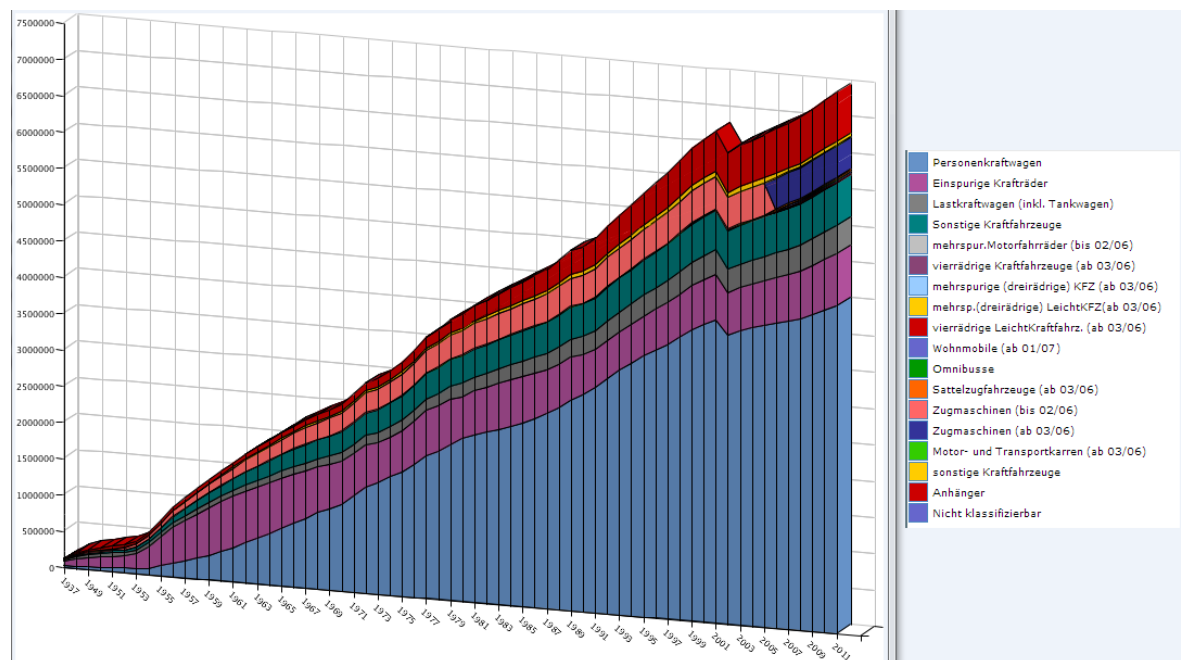


Abbildung 1: KFZ Bestand in Österreich

Quelle: STATISTIK AUSTRIA (2012)

„Erdöl ist als verarbeitetes Produkt vor allem für leitungsungebundene Verkehrs- und Transportmittel als Otto-, Diesel- oder Flugturbinenkraftstoff von besonderer Bedeutung. Aber auch im Bereich der Raumwärme ist Erdöl in Form von Heizöl ein nach wie vor wichtiger Energieträger. Daneben wird Erdöl in der chemischen Industrie zur Herstellung von Kunststoffen und anderen Chemieprodukten vielfach eingesetzt und nimmt als Schmiermittel eine Vielzahl von Anwendungsgebieten eine wichtige Position ein.“ (FVMI, 2011) S.16

Mit den vorhandenen Erdölressourcen sollte sparsam umgegangen werden, da dieser fossile Energieträger keine regenerative Energiequelle ist. „Nach Berechnungen des Oil and Gas Journal betrugen die weltweiten Ölreserven Ende 2011 rund 208 Mrd t. Im Vergleich zum Vorjahr erhöhten sie sich um 3,6 %. Dabei ist zu beachten, dass nur jene Vorkommen herangezogen werden, die mit heutigen Techniken und zu heutigen Preisen wirtschaftlich gewinnbar und durch Bohrungen tatsächlich bestätigt sind. Nimmt man dies zur Grundlage, haben sich in den letzten zehn Jahren die bestätigten Weltölreserven um mehr als ein Viertel erhöht. Etwas mehr als die Hälfte der bestätigten Ölreserven liegt im Gebiet des Mittleren Ostens. Sechs der zwölf OPEC-Mitglieder kommen aus dieser Region. Mit Venezuela, ebenfalls ein OPEC-Mitglied mit großen Ölreserven, vereint das Kartell fast drei Viertel der Weltölreserven auf sich. Das Land mit den größten Rohölreserven ist Saudi-Arabien mit rund 35,7 Mrd t (weltweit 17 %), gefolgt von Venezuela mit knapp 29 Mrd t. An den weiteren Stellen folgen Kanada (23,6 Mrd t), der Iran und der Irak. Die "Ölreichweite", eine Stichtagsbetrachtung, die das Verhältnis der bestätigten Reserven zum weltweiten Verbrauch des jeweiligen Jahres darstellt, hat sich auf etwa 51 Jahre erhöht.“ (FVMI, 2011) S.20

Nachdem der Mineralölverbrauch weltweit mehr als 4 Mrd t im Jahr 2011, siehe dazu Abbildung 2, ausmacht und aus heutiger Sicht die Erdölreserven voraussichtlich noch knappe 51 Jahre reichen, sollte nicht nur die Automobilindustrie auf Hybridtechnologie umschwenken, sondern auch Arbeitsmaschinen wie beispielsweise Stapler mit Dieselantrieb müssten umgerüstet werden.

Mineralölverbrauch

	2007 in Mio t	2008 in Mio t	2009 in Mio t	2010 in Mio t	2011 in Mio t	2011 in %	2011 Veränderung
N-Amerika/Mexiko	1.124,6	1.069,0	1.018,7	1.041,1	1.026,4	25,3%	- 1,4%
EU-Länder	706,5	705,6	667,7	662,8	645,9	15,9%	- 2,5%
davon Deutschland	112,5	118,9	113,9	115,4	111,5	2,8%	- 3,3%
davon Frankreich	91,4	90,8	87,5	84,4	82,9	2,0%	- 1,8%
davon Italien	84,0	80,4	75,1	73,1	71,1	1,8%	- 2,7%
davon UK	79,2	77,9	74,4	73,7	71,5	1,8%	- 2,6%
davon Spanien	80,4	78,0	73,6	74,1	69,5	1,7%	- 6,2%
Japan	228,7	220,9	198,3	200,3	201,4	5,0%	0,5%
China	369,3	376,0	388,2	437,7	461,8	11,4%	5,5%
Welt gesamt	4.005,0	3.987,3	3.908,9	4.031,9	4.059,1	100,0%	0,7%

Abbildung 2: Mineralölverbrauch weltweit

Quelle: BP STATISTICAL REVIEW (2012)

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der Diplomarbeit ist den Stand der Technik der Hybridtechnologie darzustellen und die Herausforderungen für die Markteinführung von Hybridfahrzeugen, wie beispielsweise eines Hybridstaplers, zu analysieren. Im Speziellen soll auf die Problembereiche bei der Energiespeicherung eingegangen werden.

Die Analyse soll nicht nur theoretisch erfolgen, sondern auch anhand eines autonomen Roboters nachvollzogen werden. Bei Erfolg ist es denkbar den Umbau des neu analysierten Antriebes auch an modernen Staplern oder anderen Arbeitsmaschinen vorzunehmen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Nach der Einführung in die Problemstellung der Entwicklung des immer wachsenden KFZ-Bestandes und der Bewusstmachung der Erdölabhängigkeit wird die Hybridtechnologie als Schlüsseltechnologie vorgeschlagen.

Im Kapitel 2 sind Arten von Motoren für verbrennungsbetriebene Fahrzeuge als auch elektrobetriebene Fahrzeuge und deren Energiespeicherung aufgezeigt. Vor allem geht dieses Kapitel auf hybridbetriebene Fahrzeuge und deren Funktionsweise ein.

Kapitel 3 beschreibt die Gegenüberstellung von Ausgangssituation der Staplermodelle und Situation Modellbau.

Die Effizienz der Elektro-, Hybridmodelle aber auch deren Vor- und Nachteile sind in Kapitel 4 aufgezeigt. Ein daraus resultierendes Systemkonzept ist hierbei thematisiert.

Aus den neu geschaffenen Erkenntnissen geht das Kapitel 5 weiterführend auf die Methodik der Entwicklungsarbeit ein.

Kapitel 6 stellt die gewonnenen Ergebnisse, deren Auswertung und die Problematik der Umsetzung gegenüber.

Das letzte Kapitel zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse und gibt einen Ausblick auf die Zukunft.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Verbrennungsbetriebene Fahrzeuge

Der Druck und der harte Konkurrenzkampf zwischen den Motorenherstellern nehmen permanent zu. Um heutzutage überhaupt eine Chance am Markt zu haben, müssen unumgängliche Anforderungen erfüllt werden. Die wichtigsten Mindestforderungen sind:

- Der Motor muss so klein und leicht wie möglich sein.
- "Die Reibungsverluste im Motor müssen minimiert werden." Vgl. (K. Reif, 2010) S.31
- Es müssen die angepeilten Reichweiten ohne Tankstopp erreichbar sein.
- Der Antrieb muss Erschütterungen und Bewegungen standhalten.
- Das System muss sicher und zuverlässig sein, um Unfälle zu vermeiden oder gar auszuschließen.
- Treibstoff und Motor müssen auch bei widrigen Temperaturen funktionieren.
- "Die gesetzlichen Vorschriften müssen eingehalten werden.
- Der Motor muss leise und effizient arbeiten." Vgl. (K. Mollenhauer, H. Tschöke, 2007) S.579 f.

Verbrennungsmotoren kommen auch bei Hybridmodellen zum Einsatz. „Generell ist der Einsatz jedes Verbrennungsmotors aus Fahrzeugen mit konventionellem Antriebsstrang in einem Hybridfahrzeug möglich. Für eine Kombination mit einem elektrischen Antrieb bieten sich sowohl Otto-, Erdgas- als auch Dieselmotoren an, jedoch mit unterschiedlichen Optimierungszielen.“ (K. Reif, 2010) S.29

2.1.1 Dieselmotor

„Der Dieselmotor ist die Verbrennungskraftmaschine mit dem höchsten effektiven Wirkungsgrad (bei großen langsam laufenden Motoren mehr als 50 %). Der damit verbundene niedrige Kraftstoffverbrauch, die vergleichsweise schadstoffarmen Abgase und das vor allem durch Voreinspritzung verminderte Geräusch verhalfen dem Dieselmotor zu großer Verbreitung.“ (K. Reif, 2010) S.14

„Dieselmotoren können sowohl nach dem Zweitakt- als auch nach dem Viertaktprinzip arbeiten. Im Kraftfahrzeug kommen hauptsächlich Viertaktmotoren zum Einsatz.“ (K. Reif, 2010) S.14

Die Arbeitsweise des Viertakt-Dieselmotors wird in den Büchern (R. Bosch GmbH, 2004) S.26 und (H.-H. Braess, U. Seiffert, 2007) S.228 erläutert.

Nachfolgend sind einige Vor- und Nachteile des Dieselmotors aufgelistet:

Vorteile des Dieselmotors	Nachteile des Dieselmotors
Wirkungsgrad bis zu 50 %	Große Geräuschemission
Geringer Kraftstoffverbrauch	Hoher Ausstoß von Stickstoffoxiden
Hohes Drehmoment im unteren Drehzahlbereich	Partikel ausstoß
Geringer Ausstoß von Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid	Hohe Produktionskosten
Lange Lebensdauer	Aufwendige Abgasreinigung

Tabelle 1: Vor- und Nachteile eines Dieselmotors

2.1.2 Ottomotor

Der Ottomotor ist einer der meist verbreitetsten Verbrennungsmotoren. Ottomotoren können sowohl nach dem Zweitakt- als auch nach dem Viertaktprinzip arbeiten. Beim Ottomotor kommt hauptsächlich die Viertakttechnik zum Einsatz.

Ähnlich wie beim Dieselmotor arbeiten auch beim Ottomotor die Takte in folgender Reihenfolge: Ansaugen, Verdichten, Arbeiten und Ausstoßen.

Die Funktionsweise des Ottomotors wird im Buch (R. Bosch GmbH, 2005) S.17 erläutert. Nachfolgend sind einige Vor- und Nachteile des Ottomotors aufgelistet:

Vorteile des Ottomotors	Nachteile des Ottomotors
Hoher Drehzahlbereich	Wirkungsgrad kleiner als 45 %
Günstiger als Dieselmotor	Hoher Kraftstoffverbrauch
Geringer Ausstoß von Stickstoffoxiden	Hohe Treibstoffkosten
Leiser als Dieselmotor	Hohes Drehmoment bei entsprechender Drehzahl
Leichter als Dieselmotor	Spezieller Kraftstoff

Tabelle 2: Vor- und Nachteile des Ottomotors

2.2 Elektrobetriebene Fahrzeuge

2.2.1 Elektromotor

„Elektromotoren haben als Antriebe bemerkenswerte Vorteile. Eine wesentliche Eigenschaft ist die Drehmomentcharakteristik, die nahezu ideal ist. Bereits ab der Drehzahl Null kann annähernd das maximale Drehmoment erreicht werden. Die Beschleunigung des Fahrzeuges vom Stillstand übertrifft dadurch Werte, die mittels moderner Dieselmotoren, Ottomotoren mit mechanischem Lader oder generell Kolbenmotoren mit höherer Leistung erreichbar sind.“ Vgl. (C. Stan, 2008) S.235

„Die Anforderungen an Elektromotoren als Antriebe entsprechen jener von Wärmekraftmaschinen: Hohe volumen- und massenbezogene Leistung, hoher Wirkungsgrad, geringer technischer Aufwand bzw. niedrige Herstellungskosten.

Alle Arten von Elektromotoren funktionieren auf Basis elektrisch generierter elektromagnetischer Felder, die infolge einer Induktion magnetische Kräfte hervorrufen. Ein magnetisches Feld kann dabei in der gleichen Lage bleiben (bei Gleichstrommotoren) oder sich drehen (bei Drehstrommotoren). In Abhängigkeit der erreichbaren Leistung und Drehzahl einerseits und des Wirkungsgrades andererseits wurden bei den bisher entwickelten und in Serie eingesetzten Elektromotoren für automobiler Antriebe unterschiedliche Varianten eingesetzt.“ (C. Stan, 2008) S.235 f.

Nachfolgend sind einige Vor- und Nachteile des Elektromotors gegenüber Verbrennungsmotoren aufgelistet:

Vorteile des Elektromotors	Nachteile des Elektromotors
Kein Ausstoß von Abgasen	Wartung der Batterien
Geringer Wartungsaufwand	Reichweite mit Batterien gering
Hoher Wirkungsgrad über 90 %	Gewicht der Batterien
Lange Lebensdauer	Verringerung der Akkuleistung bei Minusgraden
Hohes Drehmoment	Platzbedarf

Tabelle 3: Vor- und Nachteile des Elektromotors

2.2.2 Batterietechnologie

Batterien sind eine Notwendigkeit für die Speicherung von elektrischer Energie. Es gibt verschiedene Arten von Energiespeichern und auch mindestens so viele Anwendungsgebiete. Für den Automobilbereich eignen sich nicht alle Batterietypen. Die Problematik liegt meistens in der Kapazität. Andere Akkus hingegen sind wiederum zu schwer und zu groß. Schnelles Laden und Entladen stellt ebenfalls ein Problem dar, denn nicht alle Typen sind dafür geeignet. Einen Direktvergleich von Akkus erhält man in Abbildung 3.

Akkuvergleich der verschiedenen Akkutypen					
Akkutyp	Energiedichte Wh/kg	(Nenn) Zellspannung	Ladewirkungsgrad	Lebensdauer des Akkus	Selbstentladung im Monat in %
Bleiakku	30-40	2,0V	60-70%	4-8 Jahre 300-600 Z	5-10%
NiCd Akku	40-50	1,2V	70%	15 Jahre 800-1500 Z	10-15%
NiMH Akku	60-80	1,2V	70%	7-10 Jahre 350-500 Z	15-20%
NiMH LSD	60-80	1,2V	70%	7-10 Jahre 350-500 Z	1-2%
Lilon Akku	120-180	3,6V	90%	10-15 Jahre 500-800 Z	1-2%
LiPo Akku	130-150	3,7V	90%	7-10 Jahre 300-500 Z	1-2%

Abbildung 3: Akkuvergleich der verschiedenen Akkutypen

Quelle: Akku-abc (2012)

„Professor Stan war im Jahr 2008 der Überzeugung, dass die Speicherung von Elektroenergie an Bord eines Automobils mittels Batterien ein Grund war, weshalb der Elektroantrieb keinen Durchbruch erreicht hatte und nur in extrem begrenzten Nischenanwendungen zu finden war.“ Vgl. (C. Stan, 2008) S.241

Zwischenzeitlich gibt es im Batteriesektor eine enorme Weiterentwicklung. Nach der Ansicht des Autors nahm aus heutiger Sicht die Anzahl der Elektrofahrzeuge im Gegensatz zum Jahr 2008 permanent zu. Ein Weg, den viele Automobilhersteller eingeschlagen haben, führt zur Hybridtechnologie. Batterien können in Hybridantrieben sinnvoll verwendet werden, wenn einige Faktoren berücksichtigt werden. Die wichtigsten Punkte sind nachfolgend aufgereiht:

- **„Spezifische Energie (gravimetrisch) [Wh/kg]:** Hiermit ist die auf das Gewicht bezogene Energiespeicherfähigkeit des Batteriesystems gemeint. Die spezifische Energie spielt besonders dann eine Rolle, wenn lange kontinuierliche Entlade- und Ladevorgänge gefordert sind. Im Fahrzeugbereich ist sie besonders für die elektrische Reichweite wichtig. [...]
- **Spezifische Leistung (gravimetrisch) [W/kg]:** Sind die geforderten maximalen Lade- und Entladezeiten kürzer (< 1 Minute), gewinnt die spezifische Leistung eines Batteriesystems eine besondere Bedeutung. Im Fahrzeugbereich sind vor allem die Start /Stopp-Vorgänge sowie die für Hybridtechnologien typischen Beschleunigungs- und Rekuperationsvorgänge relevant. [...]
- **Energiedurchsatz [Wh]:** Bei Hybridanwendungen definiert der Energiedurchsatz gemeinsam mit einem entsprechenden Lastzyklus die Lebensdauieranforderung

an die Zelle. Teilweise wird auch noch der früher gebräuchliche Parameter des Kapazitätsdurchsatzes bzw. die Zyklenzahl angegeben. Darin ist allerdings nicht die Batteriespannung berücksichtigt, die eine maßgebliche Auswirkung auf die Lebensdauer hat. Die **Kapazität** [Ah] gibt an, welche Ladung eine Zelle oder ein System aufnehmen kann. Typischerweise haben Hybridsysteme kleine Kapazitäten, da auch nur geringere Energiemengen bewegt werden (Energie = Kapazität × Nennspannung). In E-Fahrzeugen werden Zellen mit hoher Kapazität, jedoch geringerer Leistungsfähigkeit verbaut, da diese eine höhere Energiedichte aufweisen. Der Kapazitätsdurchsatz wird oft als Vielfaches der Nennkapazität angegeben (NK). Beim konventionellen Fahrzeug werden an die 12V- Starterbatterie keine hohen Anforderungen bezüglich des Energiedurchsatzes gestellt. Befindet sich die Batterie im Dauereinsatz, wie es bei Hybridfahrzeugen während der regelmäßigen Beschleunigungs- und Bremsvorgänge der Fall ist, wird der spezifische Energiedurchsatz zu einem entscheidenden Kriterium für die Auswahl des geeigneten Energiespeichersystems.“ (P. Hofmann, 2010) S.149 ff.

2.2.2.1 Nickel-Metallhydrid-Batterie

„Das Nickel-Metallhydrid-Batteriesystem (NiMH) hat sich in den letzten Jahren als zuverlässiges und leistungsfähiges System für Hochleistungsanwendungen im Fahrzeugbereich erwiesen. Die Anwendungen reichen von Batterien für den Antriebsstrang in Hybrid-Pkws bis hin zur Versorgung von Traktionssystemen im Busbereich. Es werden hierbei höchste Anforderungen an das Batteriesystem bezüglich Leistungsdichte, Robustheit und Sicherheit gestellt. Das Nickel-Metallhydrid-Batteriesystem gilt aus elektrochemischer Sicht als weitgehend ausgereift; signifikante weitere Verbesserungen der Leistungsdaten werden in Zukunft nicht mehr erwartet. Heute konzentriert sich die Entwicklung auf die Optimierung des Gesamtsystems bezüglich Kosten, Packaging und Batteriemanagement. Auf dem Weg zu einer breiteren Kommerzialisierung des Nickel-Metallhydrid-Systems im Hybridfahrzeugbereich werden Kostenreduktion und Systemoptimierung eine wesentliche Rolle spielen.“ (P. Hofmann, 2010) S.161

Vorteile: umweltfreundlich, kein Memory-Effekt, „Spezifische Entlade- und Ladeleistung bis 1300 W/kg, kein generelles Lebensdauerproblem, hoher Energiedurchsatz möglich (abhängig von der Entladetiefe), robust gegen kurzzeitige Überladung und Tiefentladung, gute Ladungsaufnahme auch bei niedrigen Temperaturen (z.B. 10C Pulse bei -20 °C), hohe passive Sicherheit, [...], maximale Energieeffizienz auf 92 % beschränkt (Spannungshysterese)“ (P. Hofmann, 2010) S.163

Nachteile: relativ teuer, hohe Selbstentladung, „relativ hohes Systemgewicht“ (P. Hofmann, 2010) S.163

2.2.2.2 *Lithium-Ionen-Batterie*

„Lithium-Ionen-Batterien gelten als Schlüsseltechnologie wiederaufladbarer Zellen. Im Bereich mobiler Anwendungen, wie beispielsweise Elektrofahrräder, Hybridfahrzeuge als auch Elektrofahrzeuge, entwickeln sich Lithium-Ionen-Akkumulatoren zur wichtigsten Speichertechnologie.“ Vgl. (BMW, 2009) S.19

„Ein wesentlicher Grund ist die hohe Energiedichte, mit der sich eine hohe Batteriekapazität erzielen lässt. Zudem sind Lithium-Ionen-Batterien bei gleicher Kapazität ca. 30% kleiner und ca. 50% leichter als die etablierten NiMH-Batterien.“ Vgl. (H. Wallentowitz, A. Freialdenhoven, 2011) S.109

Vorteile: keine Verwendung giftiger Stoffe, kein Memory-Effekt, geringe Selbstentladung, schneller Ladevorgang, „hohe spezifische Entlade- und Ladeleistung bis zu 3000 W/kg (auf Zellebene), hohe Leistungsdichte bis zu 6000 W/l (auf Zellebene), hoher Energiedurchsatz möglich (abhängig von der Entladetiefe), hohe Zellspannung und damit verringerte Zahl im Batterieverband zu verschaltender Zellen, nahezu 100 % Ladungswirkungsgrad, sehr gutes Langzeitverhalten (kalendarisch und Zyklen)“ (P. Hofmann, 2010) S.167

Nachteile: hohe Kosten durch Einsatz teurer Materialien und Sicherheitselektronik, verkürzte Lebensdauer durch hohe Temperaturen und hohe Lade- und Entladeströme, „sensibel gegen Überladung und Tiefentladung, Einzelzellüberwachung notwendig“ (P. Hofmann, 2010) S.167

2.2.2.3 *Blei-Säure-Batterie*

„Die bekannteste Anwendung der Blei-Säure-Batterie ist der Einsatz als Starterbatterie in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor oder auch als Traktionsbatterie für Gabelstapler. Die Energiedichte ist mit 20-35 Wh/kg sehr gering. Aufgrund nicht zu erwartender gravierender Leistungsverbesserungen werden Blei-Säure-Konzepte für die zukünftige Elektromobilität keine große Rolle besetzen können.“ Vgl. (H. Wallentowitz, A. Freialdenhoven, 2011) S.107 f.

Vorteile: kein Memory-Effekt, preiswert, etablierte Technologie

Nachteile: geringe Lebensdauer, geringe Energiedichte, temperaturempfindlich, wartungsintensiv, umweltschädlich durch die Verwendung von Blei

Zusammenfassend lässt sich folgender Schluss ziehen: Verbrennungsbetriebene Fahrzeuge haben einen schlechteren Wirkungsgrad als elektrobetriebene Fahrzeuge. Hingegen ist die Reichweite bei Elektrofahrzeugen begrenzt, da die Kapazitäten von Batterien relativ schnell erschöpft sind. Solange bei den Akkumulatoren noch keine absolute Leistungsverbesserung zu erwarten ist, muss eine andere Lösung gefunden werden. Eine zu betrachtende Lösung ist das Hybridfahrzeug. Einerseits ergibt sich hierbei die Möglichkeit

vielfältige neue Kombinationen zu nutzen (siehe Kapitel 2.3), andererseits erscheint es derzeit die beste Alternative zu sein.

2.3 Hybridfahrzeuge

„Das Wort „Hybrid“ kommt aus dem Lateinischen und bedeutet so viel wie Zwitter, von zweierlei, andersartigen Eltern. Die UNO definierte 2003 den Begriff „Hybridfahrzeug“ wie folgt: Ein „Hybridfahrzeug“ bezeichnet ein Fahrzeug, in dem mindestens zwei Energieumwandler und zwei Energiespeichersysteme (im Fahrzeug eingebaut) vorhanden sind, um das Fahrzeug anzutreiben. Grundsätzlich kommen bei den Energiespeichern chemische, elektrische oder mechanische Speichersysteme in Frage. Praktisch gesehen macht die Kombination von konventionellen chemischen Energiespeichern bzw. Energieträgern wie Benzin oder Diesel mit einem während des Betriebes wieder aufladbaren Speicher, beispielsweise einem elektrischen oder mechanischen System, Sinn, da damit mehr Freiheitsgrade beim Betrieb geschaffen werden.“ (P. Hofmann, 2010) S.2 f.

2.3.1 Entwicklungsgeschichte des Hybrides

„Das weltweit erste Patent für ein benzin-elektrisches Motorfahrzeug wurde 1905 angemeldet. Das Ziel der Entwicklung war nicht die Energieeinsparung sondern verbesserte Beschleunigungswerte (0 auf 40 km/h in 10 Sekunden). Trotz schneller Fortschritte bei Benzinmotoren lieferte die Hybridtechnologie Stoff für visionäre Fahrzeugkonzepte in den USA dieser Zeit. Für die Konsumenten war jedoch Geschwindigkeit wichtiger als Sparsamkeit, weshalb ein 1914 angebotener Hybrid mit einem Verbrauch von 3,6 l/100 km keinen Anklang fand. Die ersten Hybrid-Lkw wurden bereits 1918 gebaut.

Zur Verbesserung der Luftqualität empfahl der US-Kongress 1966 die Förderung elektrischer Fahrzeuge. Ferner führten Entwicklungen in anderen Industriebereichen zu langlebigeren Batterien, welche für den Einsatz auf Fernstraßen geeignet waren. Den eigentlichen Schub erlebten hybride Antriebe allerdings erst während der Ölkrise in den 1970ern. Mit größer werdenden städtischen Umweltproblemen nahmen Volkswagen und Toyota weltweit Spitzenstellungen mit der Produktion von Prototypen hybrider Taxis und Busse ein. Die kalifornische Regierung erließ die ersten Gesetze über Mindestverkaufsquoten emissionsfreier Fahrzeuge.

Als erstes Unternehmen bot Toyota 1997 schließlich das erste serienmäßige Hybridfahrzeug an. Diese wurden allerdings nur in Japan angeboten. In den USA war Honda der erste Anbieter von Hybridautos. Nach Prius und Civic folgte 2004 der Ford Escape.“ (UBA, 2007) S.7

Viele Autohersteller erkannten nach Toyota das Potenzial des Hybridantriebes und begannen ebenfalls Hybridmodelle zu entwickeln. „Audi startete fast zeitgleich mit Toyota den Audi Duo Hybrid im Jahr 1997 zu bauen. Mittlerweile kann Audi einige Hybridmodelle

anbieten. Unter anderem sind das aktuelle Modelle wie z.B.: Der Prototyp Audi A6 L e-tron concept 2012, Audi A8 Hybrid 2012, der Prototyp Audi crosslane coupé 2012, der Rennwagen und Prototyp Audi R18 e-tron quattro 2012. Audi ist nicht der einzige Hersteller, der Entwicklungskosten in die Hybridtechnologie investiert hat. Die Automobilhersteller BMW, Chevrolet, Citroën, Daihatsu, Fisker, Ford, GMC, Honda, Land Rover, Lexus, Mazda, Mercedes-Benz, Nissan, Opel, Peugeot, Porsche, Saturn, Seat, Subaru, Volkswagen und Volvo entschlossen sich ebenfalls Hybridfahrzeuge zu entwickeln.“ Vgl. (Hybrid-Autos.Info, 2013)

2.3.2 Arten von Hybridantrieben

Hybridfahrzeuge sind in verschiedene Varianten eingestuft. Jeder Hersteller versucht dennoch individuelle Lösungen zu entwickeln und bewirbt die Vorteile seines Konzeptes. Dessen ungeachtet können Hybride grob gegliedert werden, und zwar hinsichtlich ihrer Leistung in Mikro-, Mild-, Voll- und Plug-In-Hybride und ihres Aufbaus in Seriell-, Parallel- und Misch-Hybridantriebe.

2.3.2.1 Gliederung nach Leistung

Bevor näher auf die einzelnen Klassen eingegangen wird, kann man sich einen Gesamtüberblick in Abbildung 4 verschaffen.

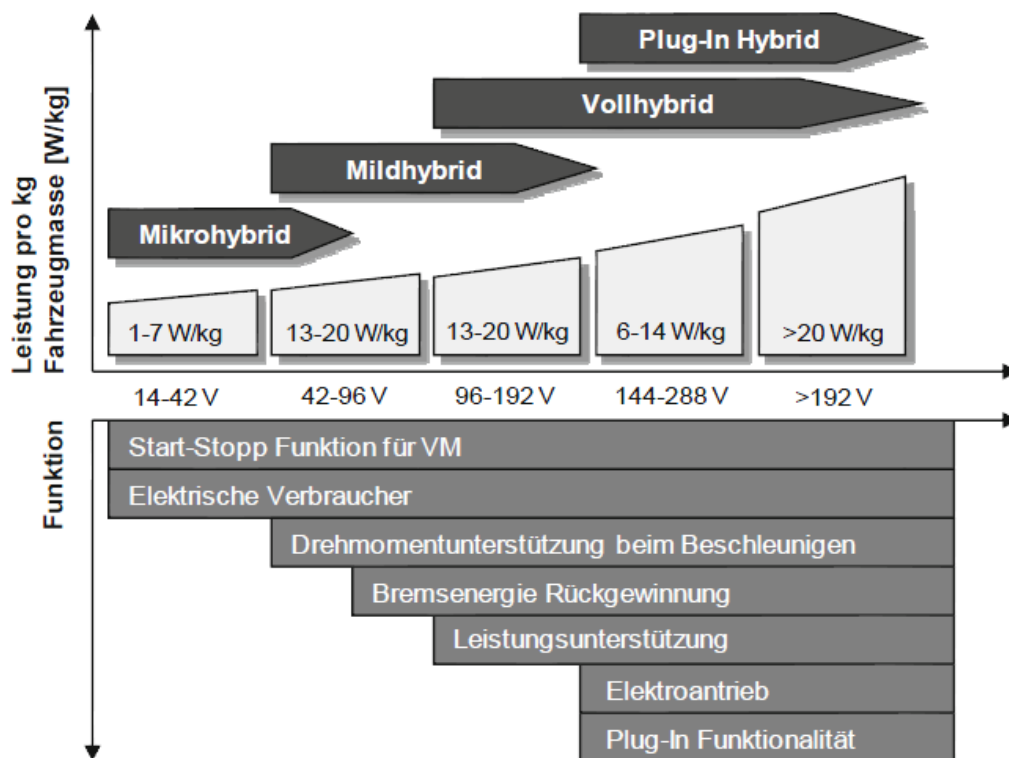


Abbildung 4: Übersicht der Hybridklassen nach elektrischer Leistung

Quelle: H. Wallentowitz, A. Freialdenhoven, (2011) S.61

Mikro-Hybrid

„Die auf dem europäischen Markt zuerst angebotene Hybridisierung war der eher zögerliche Ersatz von Lichtmaschine und Anlasser durch einen integrierten Starter-Generator. Diese Kombinations-Elektromaschine wurde von einigen Herstellern in den Antriebsstrang integriert, von anderen über einen Riemen mit der Kurbelwelle verbunden.

Für diese Lösung musste die Batterie mit einer etwas vergrößerten Kapazität versehen werden. Sobald eine Fahrgeschwindigkeitsschwelle unterschritten wird und der Fahrer den Fuß auf der Bremse hat, geht der Motor aus. [...] Sobald der Fuß von der Bremse geht, springt der Motor wieder an. [...] Mit solch einem Mikro-Hybrid sind 7 % bis 11 % Kraftstoffeinsparung möglich.“ (H. Wallentowitz, A. Freialdenhoven, 2011) S.61 f.

Mild-Hybrid

„Sobald eine 5 bis 15 kW Elektromaschine eingesetzt wird, spricht man von einem Mild-Hybrid. Hier ist die Bremsenergieerückgewinnung normalerweise üblich. Auch eine Antriebsunterstützung kann durch den Elektromotor bereitgestellt werden. Das geschieht vor allem bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten, weil in diesem Betriebszustand der Elektromotor viel besser ist als der Verbrennungsmotor. Die größte Kraftstoffeinsparung kommt auch hier durch das Abschalten des Verbrennungsmotors zustande.

Der Mild-Hybrid kann ebenfalls sowohl mit einer integrierten Maschine als Integrated Starter Generator (ISG) von z.B. Continental als auch mit einer riemengetriebenen Maschine als Belt Alternator Starter (BAS) von z.B. Valeo realisiert werden. Die Spannungen liegen bei diesen Systemen zwischen 42 Volt und 150 Volt. Damit werden gesonderte Energiespeicher erforderlich, z.B. spezielle Hochvoltbatterien oder auch Super-Kondensatoren (sogenannte SuperCaps). Diese Energiespeicher müssen sowohl kurzzeitig hohe Ströme zum Antreiben abgeben, als auch noch höhere Ströme beim Bremsen aufnehmen können. Als erreichbare Kraftstoffeinsparungen werden 15 % bis 20 % im Vergleich zum konventionellen Verbrennungsmotor genannt.“ (H. Wallentowitz, A. Freialdenhoven, 2011) S.62

In nachfolgender Grafik (Abbildung 5) sieht man ein angenommenes Fahrspiel der Hybridversion VUE der Firma Saturn.

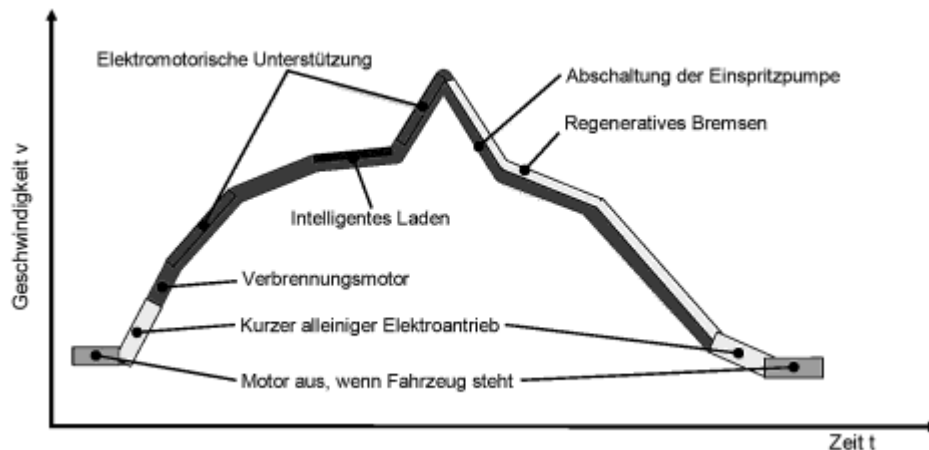


Abbildung 5: Fahrspiel eines Hybridfahrzeuges

Quelle: H. Wallentowitz, A. Freialdenhoven, (2011) S.63

„Daraus wird deutlich, dass sowohl zum Anfahren als auch zum Boosten zwischendurch auf den elektrischen Antrieb zurückgegriffen wird. Während der Verzögerung wird der Verbrennungsmotor gar nicht gestartet, bei niedrigen Geschwindigkeiten überbrückt der Elektromotor allein. Der Mild-Hybrid wird von mehreren Herstellern als ein Optimum zwischen sowohl dem technischen und finanziellen Aufwand als auch den erreichbaren Einsparungen an Kraftstoff angesehen.“ (H. Wallentowitz, A. Freialdenhoven, 2011) S.63

Voll-Hybrid

„In Vollhybriden erbringen die elektrischen Komponenten Leistungen von über 20 kW, die Batterien oder SuperCaps haben Spannungen von 300 Volt und ermöglichen somit erstmals rein elektrisches Fahren. Die Kopplung der beiden Antriebe kann hier abhängig vom Fahrzeugtyp und der Nutzungscharakteristik verschiedene Formen annehmen. Es wird grundlegend zwischen seriellen, parallelen und leistungsverzweigten Hybriden unterschieden. Die größte technische Herausforderung bei der Realisierung von Vollhybriden stellt die Batterietechnik dar. Um über längere Strecken rein elektrisch fahren zu können, sind im Vergleich zu Mikro- und Mildhybriden wesentlich erweiterte Batteriekapazitäten notwendig. Die in derzeitigen Modellen in der Regel verbauten NiMH-Batterien ermöglichen lediglich begrenzte Reichweiten von unter 10 km. Die zukünftig eingesetzten leistungsfähigeren Li-Ionen-Batterien werden die rein elektrisch zurückgelegte Strecke auf rund 20 km verdoppeln.“ Vgl. (H. Wallentowitz, A. Freialdenhoven, 2011) S.63 f.

Plug-In-Hybrid

„Eine Weiterentwicklung der Vollhybride stellen die Plug-In Hybride dar. Strukturell identisch zu den vorhergehenden Ausführungen verfügen sie über die Möglichkeit, die Batterie zusätzlich zum Verbrennungsmotor auch extern über eine Ladebuchse zu laden. Der

Strom muss dementsprechend nicht onboard generiert werden, sondern er kann dem häuslichen Strommix entnommen werden. Plug-In Hybride nehmen in ihrer Funktionalität wesentlichen Bezug auf das durchschnittliche Nutzungsprofil von Kraftfahrzeugen. In Europa weisen 80 % der täglich zurückgelegten Strecken eine Distanz von unter 50 km auf. In den USA legen zwei Drittel aller US-Bürger täglich weniger als 40 Meilen (64 km) mit dem Auto zurück. Vor diesem Hintergrund bieten Plug-In Hybride die Möglichkeit, den größten Teil der Strecken rein elektrisch zu bewältigen und den Verbrennungsmotor lediglich bei Langstreckenfahrten als Range Extender zu nutzen. Im Stadtverkehr mit überwiegend kurzen Fahrstrecken verhalten sich Plug-In-Hybride dann wie reine Elektrofahrzeuge.“ Vgl. (H. Wallentowitz, A. Freialdenhoven, 2011) S.70

2.3.2.2 Gliederung nach Aufbau

Serieller Hybridantrieb

„Die Charakteristik eines seriellen Hybridantriebes (S-HEV) ist die Reihenschaltung der Energiewandler (E-Maschinen und Verbrennungsmotor). Für die serielle Anordnung sind neben dem Verbrennungsmotor zwei Elektromotoren erforderlich, wobei einer generatorisch und der andere motorisch arbeitet. Der Verbrennungsmotor ist nicht mit der Antriebsachse verbunden. Zunächst wird die Bewegungsenergie des Verbrennungsmotors von einem Generator (siehe Abbildung 6, 4) in elektrische Energie umgesetzt. Der Pulswechselrichter (siehe Abbildung 6, 6) wandelt die Leistung gemäß Fahrerwunsch und versorgt den zweiten Elektromotor (siehe Abbildung 6, 5), der für den Antrieb der Räder verantwortlich ist. Die Leistung, die zur Bewegung des Fahrzeugs erforderlich ist, wird ausschließlich vom Elektromotor (siehe Abbildung 6, 5) auf die Antriebswelle übertragen. Vorteil dieser Triebstranganordnung ist es, dass der Betriebspunkt des Verbrennungsmotors frei gewählt werden kann, solange die angeforderte elektrische Energie bereitgestellt wird. Je nach Betriebsstrategie kann der Verbrennungsmotor mit seiner Leistung dem aktuellen Bedarf folgen oder er kann gleichmäßig im effizientesten Betriebspunkt arbeiten und überschüssige Energie an die Batterie abgeben. Der Betrieb im effizientesten Betriebspunkt ermöglicht besonders niedrige Schadstoffemissionen - mit Ausnahme der NOX-Emissionen. Es ist zu beachten, dass beide E-Maschinen groß genug dimensioniert sein müssen, um die Leistung des Verbrennungsmotors aufnehmen bzw. abgeben zu können. Die große Leistungsfähigkeit der E-Maschinen hat zusätzlich den Vorteil, dass auch starke Fahrzeugverzögerungen rekuperiert werden können. Ein Nachteil dieser Anordnung besteht in der mehrfachen Energieumwandlung und den damit verbundenen Wirkungsgradverlusten. Ausgehend von den üblichen mittleren Verlusten der einzelnen Komponenten ergibt sich ein Gesamtverlust von etwa 30 %. Weitere Nachteile sind hohe Kosten, Bauteilgröße und ein hohes Mehrgewicht.“ Vgl. (K. Reif, 2010) S.16

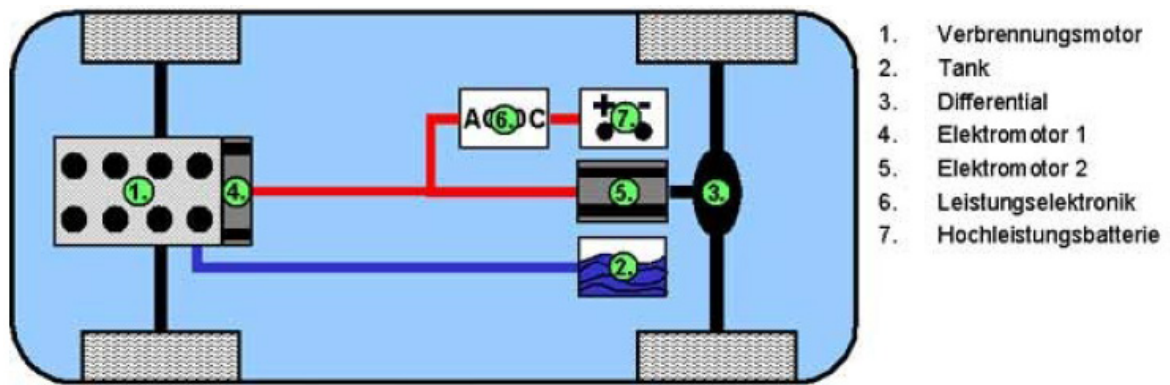


Abbildung 6: Serieller Hybridantrieb

Quelle: FH Berlin, Prof. Dr.-Ing. S. Tschirley

Paralleler Hybridantrieb

„Im Unterschied zu den seriellen und leistungsverzweigenden Konzepten wird bei parallelen Antriebsstrangtopologien nur eine E-Maschine benötigt [...] (siehe Abbildung 7, 5) [!]. Diese kann sowohl generatorisch als auch motorisch betrieben werden und ist mechanisch mit der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors verbunden. Es handelt sich um eine Momentenaddition, bei der die Drehmomente der Antriebe (Verbrennungsmotor und E-Maschine) frei variiert werden können, während die Drehzahlen in einem festen Verhältnis zueinander stehen. Außerdem ist bei geschlossener Kupplung eine rein mechanische Kraftübertragung vom Verbrennungsmotor auf die Antriebsachse möglich, unabhängig vom Zustand der E-Maschine. Der Gesamtwirkungsgrad liegt dadurch höher als bei den anderen Hybrid-Topologien.“

Die direkte Anbindung der E-Maschine an den Verbrennungsmotor wirkt sich allerdings nachteilig auf die Wahlfreiheit des Betriebspunktes aus, da die Drehzahlen beider Aggregate durch die Getriebeübersetzung und die Fahrgeschwindigkeit festgelegt sind. Diese können durch eine Getriebschaltung verändert werden, jedoch nur für beide Aggregate in gleicher Weise. Bei Verwendung eines Stufengetriebes kann die Drehzahl des Antriebsverbunds aus E-Maschine und Verbrennungsmotor also nicht kontinuierlich frei gewählt werden.“ (K. Reif, 2010) S.17

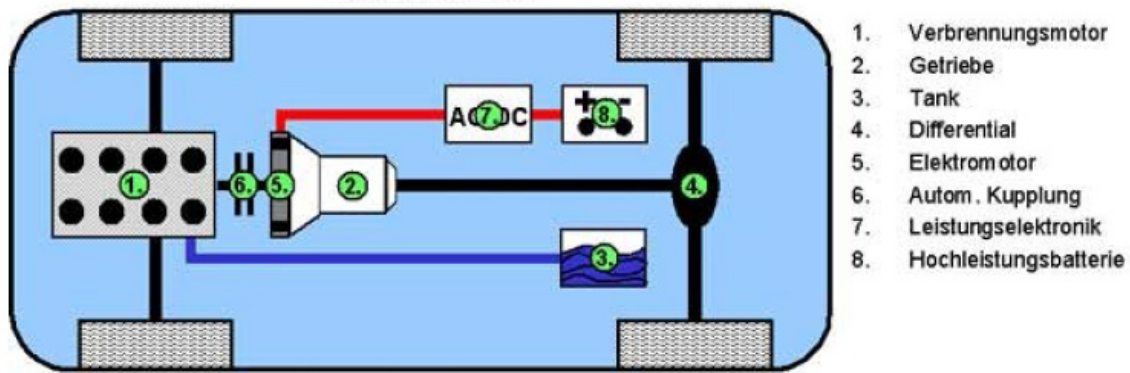


Abbildung 7: Paralleler Hybridantrieb

Quelle: FH Berlin, Prof. Dr.-Ing. S. Tschirley

Leistungsverzweigter Hybridantrieb

„Kernelement der leistungsverzweigenden Hybridtopologie ist das Planetengetriebe [...]. In diesem wird die Leistung des Verbrennungsmotors auf zwei Pfade aufgeteilt. Dabei handelt es sich um einen mechanischen Pfad, bei dem durch Verzahnung direkt Kraft auf die Räder übertragen werden kann, und einen elektrischen Pfad.“ (K. Reif, 2010) S.20

Ein Beispiel für einen leistungsverzweigten Hybridantrieb ist in Abbildung 8 dargestellt. Das Planetengetriebe wurde in dieser Grafik nicht eingezeichnet.

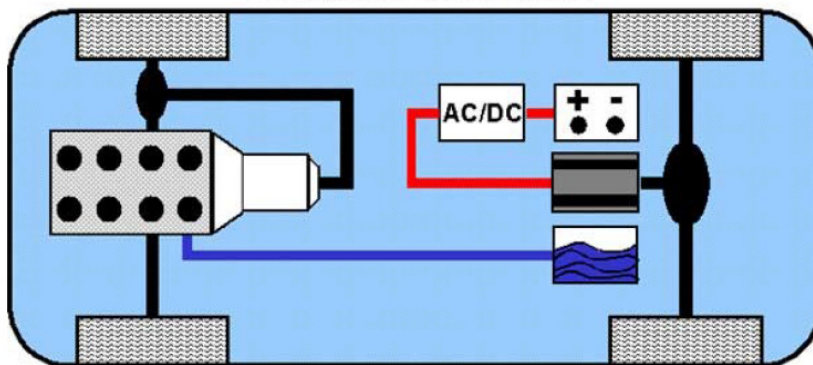


Abbildung 8: Leistungsverzweigter Hybridantrieb

Quelle: FH Berlin, Prof. Dr.-Ing. S. Tschirley

2.3.3 Betriebsarten

Der Hybridantrieb bietet dem Fahrer neue und zusätzliche Möglichkeiten des Fahrens, die er in einem herkömmlichen Kraftfahrzeug nicht zur Verfügung hatte. Mit erhöhtem technischem Aufwand kann das Fahrzeug in verschiedenen Einstellungen bedient werden.

2.3.3.1 Elektrisch fahren

„Rein elektrisches Fahren (siehe Abbildung 9) [!], bei dem das Fahrzeug über längere Strecken alleine durch die E-Maschine angetrieben wird, ist nur beim Full Hybrid möglich. Der Verbrennungsmotor wird dafür von der E-Maschine abgekoppelt [...]. In diesem Betriebsmodus kann das Fahrzeug nahezu lautlos und lokal emissionsfrei fahren.“ (K. Reif, 2010) S.12

Dieser Vorteil kommt vor allem der Umwelt und den Mitmenschen zugute. Erstmals interagiert der Fahrer mit dem Hybridfahrzeug über einen einfachen Tastendruck den so genannten „Electric Vehicle“ - Fahrmodus. Somit kann in Wohnsiedlungen, Parkhäusern oder in der Nähe von Erholungsanlagen sowie Spielplätzen bewusst auf den Einsatz von Verbrennungsmotoren verzichtet werden.

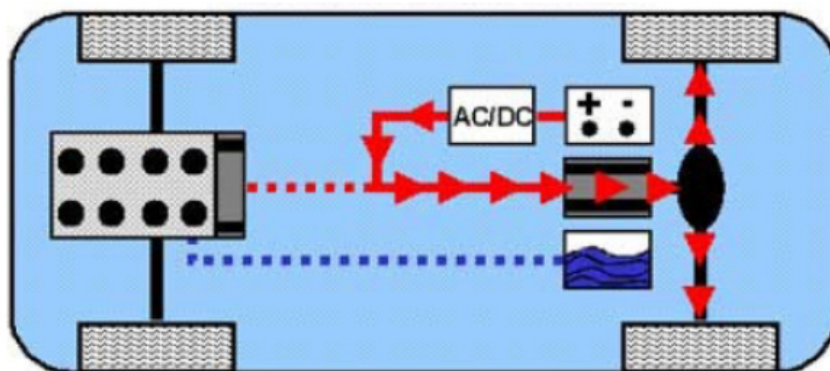


Abbildung 9: Serieller Hybridantrieb – Elektrisch fahren

Quelle: FH Berlin, Prof. Dr.-Ing. S. Tschirley

2.3.3.2 Generatorbetrieb

„Im Generatorbetrieb (siehe Abbildung 10) [!] wird der elektrische Energiespeicher aufgeladen. Zu diesem Zweck wird der Verbrennungsmotor so betrieben, dass er eine größere Leistung abgibt, als für den gewünschten Vortrieb des Fahrzeugs erforderlich ist. Der überschüssige Leistungsanteil wird dem Generator zugeführt und in elektrische Energie umgewandelt, die im Energiespeicher gespeichert wird [...].

Auch im Schubbetrieb wird der Energiespeicher über den Generator aufgeladen, sofern der Batterieladezustand dies erlaubt.“ (K. Reif, 2010) S.12

In diesem Modus kann durch die permanente Stromzufuhr auf eine Lichtmaschine verzichtet werden. Somit können bei betriebenem Generator elektrische Verbraucher mit gespeist werden.

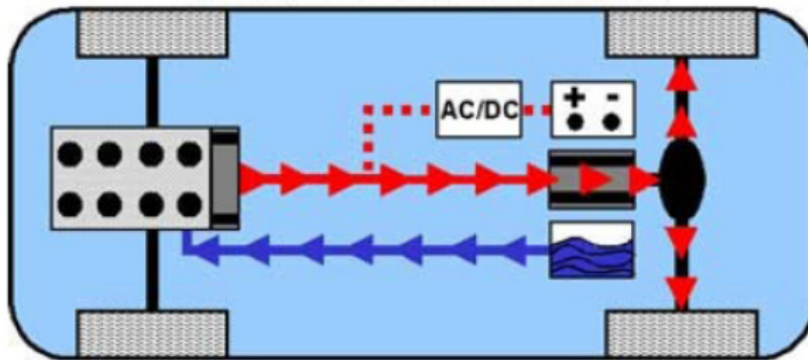


Abbildung 10: Serieller Hybridantrieb – Generatorbetrieb

Quelle: FH Berlin, Prof. Dr.-Ing. S. Tschirley

2.3.3.3 Normalbetrieb

Während des normalen Fahrbetriebs treibt der Verbrennungsmotor den Generator drehzahlregelt an. Dabei wird die Drehzahl durch die Belastung des Elektromotors ermittelt. Das Verhältnis Verbrauch und Leerlauf wird permanent überwacht und stets so nachgeführt, dass ein maximaler Wirkungsgrad gewährleistet ist.

2.3.3.4 Boosten

„Im Boost-Betrieb (siehe Abbildung 11) [!] geben Verbrennungsmotor und E-Maschine positives Antriebsmoment ab. Für das maximale Vortriebsmoment des Fahrzeuges geben beide ihr maximales Drehmoment ab [...].“ (K. Reif, 2010) S.12

Die Fahrleistung wird gegenüber einem konventionellen System deutlich verbessert. Der Boost ist vor allem bei Überholmanövern äußerst nützlich.

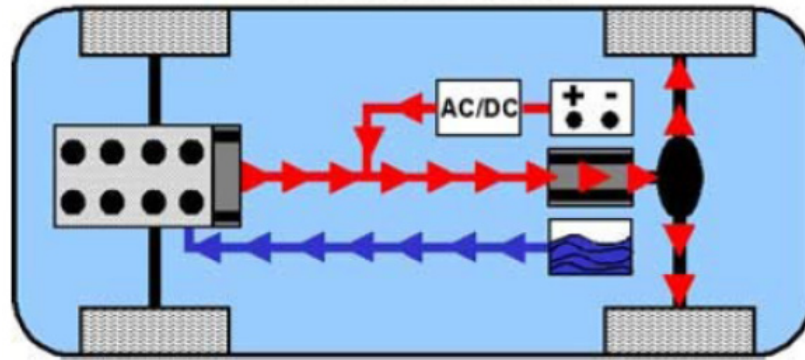


Abbildung 11: Serieller Hybridantrieb – Boosten

Quelle: FH Berlin, Prof. Dr.-Ing. S. Tschirley

2.3.3.5 Rekuperation

„Beim regenerativen Bremsen wird das Fahrzeug nicht – oder nicht nur – durch das Reibmoment der Betriebsbremse abgebremst, sondern durch ein generatorisches Bremsmoment des Elektromotors. Der Elektromotor wird also generatorisch betrieben und wandelt kinetische Energie des Fahrzeugs in elektrische Energie um, die im Energiespeicher gespeichert wird [...]. Regeneratives Bremsen wird auch als rekuperatives Bremsen oder als Rekuperation (siehe Abbildung 12) [!] bezeichnet.“ (K. Reif, 2010) S.13

Dadurch wird ein Großteil der Bewegungsenergie nicht in Wärme in der Bremse umgewandelt. Die Bremsstaubbelastung wird gesenkt und der Feinstaub kann daher reduziert werden.

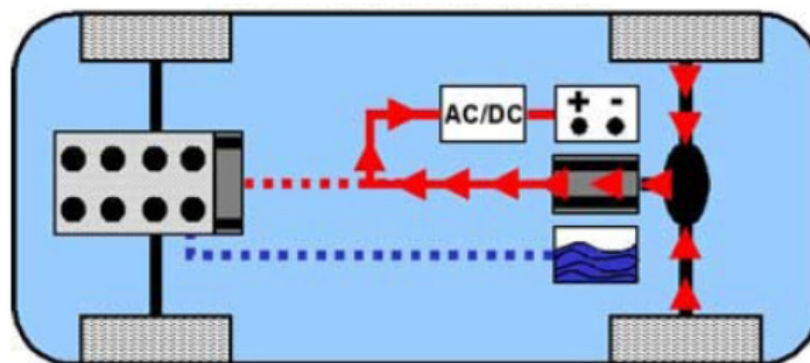


Abbildung 12: Serieller Hybridantrieb – Rekuperation

Quelle: FH Berlin, Prof. Dr.-Ing. S. Tschirley

2.3.3.6 Segeln

„Das Segeln beginnt, wenn der Fahrer den Fuß vom Gaspedal nimmt und den Wagen rollen lässt. Herkömmliche Autos verlieren dabei durch die bremsende Wirkung des Motors einiges an Schwung. Beim Cayenne Hybrid aber wird der Verbrennungsmotor abgeschaltet, wenn der Fahrer vom Gas geht. Der schwere Geländewagen saust dann dahin, nur gestört vom Widerstand der Luft und der Reifen.“ (Welt.de, 2009)

In dieser sogenannten Segelphase verbraucht das Fahrzeug keinen Kraftstoff und spart somit den Ausstoß von Schadstoffen ein.

2.3.3.7 Start/Stopp

„Wird das Fahrzeug angehalten, so prüft das Motorsteuergerät, ob

- kein Gang eingelegt ist,
- der Drehzahlsensor des Antiblockiersystems Null angibt,
- der elektronische Batteriesensor genügend Energie für einen Startvorgang meldet.

Sind diese Bedingungen erfüllt, so wird der Motor automatisch abgeschaltet. Sobald die Kupplung betätigt wird, bekommt der Starter das Signal, den Motor wieder zu starten. Der Motor wird schnell und leise gestartet und ist sofort wieder betriebsbereit.“ (K. Reif, 2010)
S.13

3 Präzisierung der Aufgabenstellung

Die Automobilindustrie entwickelt immer bessere Hybridantriebe. Der Schwerpunkt in dieser Diplomarbeit soll hierbei nicht allein in der Verbesserung automobiler Antriebe liegen. Die Thematik soll primär von Arbeitsmaschinen wie beispielsweise Staplern handeln. Nach einem Gespräch mit der Firma Still beschloss der Autor, anhand der mündlichen Informationen, eine verbesserte Form des Hybridmodells zu untersuchen. Aus rechtlichen Gründen (Betriebsgeheimnis) bekam der Autor vereinzelte Datenblätter, die rudimentäre Informationen enthielten. Mitunter war das der Anlass weshalb sich der Autor für einen fahrtauglichen Modellaufbau entschied.

3.1 Ausgangssituation Stapler

3.1.1 Elektrostapler

Der Elektro-Gabelstapler RX 60 von der Firma Still (siehe Abbildung 13) ist das Ausgangsmodell der Untersuchungen in der Diplomarbeit. Diese Arbeitsmaschine wird mit dem Elektromodell Roboter RP6 als Basis gleichgesetzt. Genauere Informationen zum RP6 werden im Abschnitt 3.2.1 bekannt gegeben.



Abbildung 13: Elektro-Gabelstapler RX 60

Quelle: Still (2013)

„Der energie- und geräuschoptimierte Drehstromantrieb des RX 60 wirkt auf die Vorderräder. Extrem hohe Fahrleistungen und Fahrdynamik, auch bei unebenen Böden oder Steigungsfahrten, sorgen für hohe Umschlagleistung. Die Boost-Funktion des RX 60 stellt eine sinnvolle Besonderheit dar, die bei Bedarf das maximale Drehmoment des Fahrmotors mobilisiert und so z.B. an Schwellen ein Maximum an Vorschubkraft zur Verfügung stellt. Der wartungsfreie, wirkungsgradoptimierte Drehstromantrieb gewährleistet eine lange Batteriestandzeit. Durch seine komplette IP 54 Kapselung ist der gesamte Antrieb geschützt gegen das Eindringen von schädlichem Staub und Spritzwasser, sodass Einsätze auch bei schlechtesten Bedingungen kein Problem sind.

Zudem speist der Motor durch seine elektrische Nutzbremmung beim Loslassen des Fahrpedals je nach Einsatz bis zu 15% Energie in die Batterie zurück und verlängert somit die Nutzungsdauer einer Batterieladung um bis zu 1,5 Stunden. Dadurch kann oft ein Batteriezwischenladen oder -wechseln entfallen.“ (Still, 2013) S.6

„Die elektrische Anlage des RX 60 arbeitet digital. Die beiden getrennten CAN-Bus-Systeme ermöglichen einen Betrieb ohne Rückwirkungen auf den Antriebsstrang, was eine Ausfallsicherheit schafft. Die robuste Steuerung mit zwei Prozessoren, welche sich gegenseitig überwachen, sorgt für größtmögliche Sicherheit. Über bereits vorbereitete Anschlüsse wird die einfache Nachrüstung weiterer elektrischer Verbraucher ermöglicht.“ (Still, 2013) S.6

3.1.2 Hybridstapler

Der dieselbetriebene Hybrid-Gabelstapler RX 70 von der Firma Still (siehe Abbildung 14) ist dem umgebauten Elektromodell Roboter RP6 als Hybridvariante gleichzustellen. Eine absolute Gegenüberüberstellung ist nicht möglich, da zu viele verschiedene Faktoren zu berücksichtigen wären. Das tatsächliche Prinzip wurde im Modellbau nur annähernd berücksichtigt.



Abbildung 14: Dieselbetriebener Hybrid-Gabelstapler RX 70

Quelle: Still (2013)

„Um einen ebenso kraftvollen wie sparsamen Antrieb zu gewährleisten, kombiniert der dieselbetriebene Hybrid-Gabelstapler Energiegewinnung mit einem elektrischen Energiespeicher in Form von Ultracaps. Falls das Fahrpedal losgelassen wird, entsteht durch das Abbremsen kinetische Energie, die in elektrische Energie umgewandelt und in den Ultracaps gespeichert wird. Die aus dem System zurückgeflossene, gewonnene Energie kann sofort wieder bereitgestellt werden. Diese Energierückgewinnung, kombiniert mit einer höchst effizienten Nutzung des Verbrennungsmotors, setzt zusätzliche Energiesparpotenziale frei und ermöglicht, je nach Arbeitsspiel, eine Kraftstoffersparnis von bis zu 15 Prozent“ Vgl. (Still, 2013) S.6

Abbildung 15 zeigt den derzeitigen Aufbau des Antriebes der Hybridstapler Technologie.

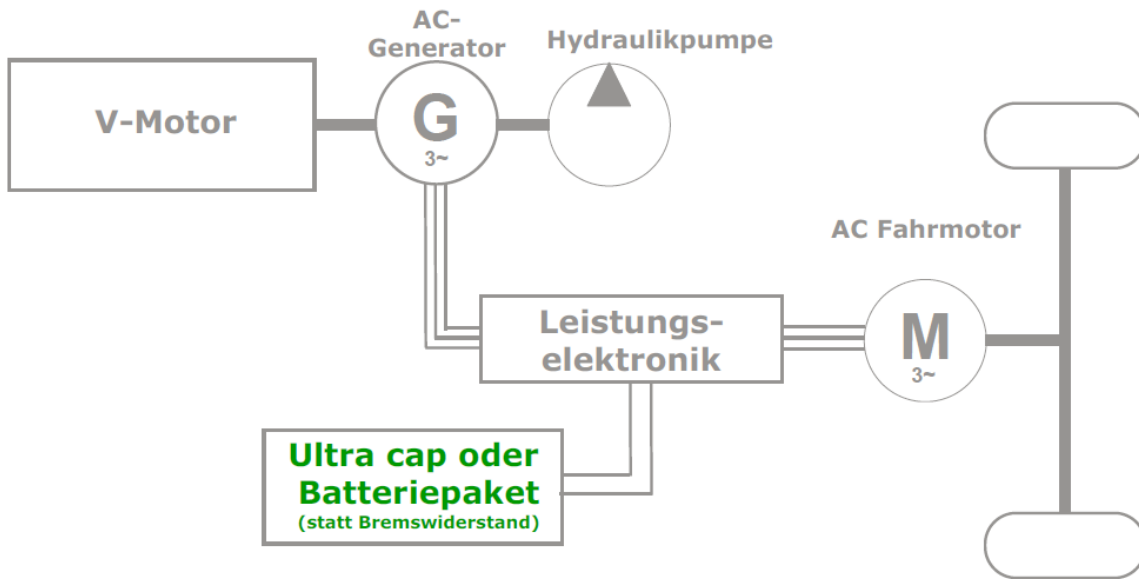


Abbildung 15: Derzeitiger Hybridantrieb Firma Still

Quelle: Still (2013)

Der in Abbildung 15 dargestellte Hybrid hat einen seriellen Hybridantrieb. Statt der üblicherweise eingesetzten Hochleistungsbatterie werden bei diesem Modell hauptsächlich Ultracaps eingesetzt.

Ein wesentlicher Vorteil des Hybrid-Gabelstaplers ist, dass der Generator nicht ausschließlich mit einem Dieselmotor betrieben werden muss. Für den Antrieb können auch Treibgas- und Erdgasmotoren eingesetzt werden. Ebenso überzeugend ist die hohe Verfügbarkeit des dieselektrischen Antriebes. Der Stapler ist dauerhaft einsetzbar und muss sich an keine Ladestation andocken. Ein Tausch der Batterie entfällt bei diesem Modell. Außerdem arbeitet der Verbrennungsmotor immer im günstigsten Drehzahlbereich und verbraucht somit weniger Treibstoff. Im Gegensatz zu einem herkömmlichen Dieselstapler werden die Emissionswerte des Hybridstaplers auf ein Minimum reduziert.

„Ein Ruhezustand, der üblicherweise beim Mildhybrid in Verwendung ist, gibt es bei diesem Staplermodell nicht. Die Drehzahl des Dieselmotors wird zwar je nach Beanspruchung geregelt, die Mindestumdrehungen sinken dennoch auf das Maximum der Standgaseinstellung ab. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Generator bei stehendem Fahrzeug weiter läuft. In diesem Zustand werden durch die überflüssige Energie die Ultracaps gepuffert.“

Der Hybridstapler besitzt zusätzlich eine autarke Motorstarteinheit, die vom Hersteller VW geliefert wird. Diese Einheit enthält einen Anlasser, eine Blei-Säure Batterie und eine Lichtmaschine. Die Blei-Säure Batterie versorgt in diesem Fall alle relevanten Komponenten, die für einen Motorstart benötigt werden. Sobald das Zündschloss in die Position

Starten gestellt ist, wird der Dieselmotor über den Anlasser gestartet. Die Lichtmaschine wird bei laufendem Dieselmotor über einen Riemen angetrieben und lädt die Blei-Säure Batterie wieder auf.“ Vgl. (Still, 2013)

3.2 Nachbau im Modellbau

3.2.1 Elektromodell

Der Roboter RP6 eignete sich, wegen seiner Erweiterungsmöglichkeit, als Vergleichsmodell zum Elektrostapler und kam deshalb zum Einsatz. Eine exakte Nachbildung ist nicht Bestandteil der Diplomarbeit. Da es sich um einen Prototypen handelt, wurden die Originalbauteile des RP6 beibehalten. Weiteres unterscheidet sich der Roboter durch seinen Gleichstromantrieb (siehe Abbildung 16). Eine Boost-Funktion wird bei diesem Modell nicht vorgesehen. Beim RP6 wird auch auf die Nutzbremung nicht näher eingegangen. Die erwähnten Unterscheidungen wurden vor allem deshalb vernachlässigt, beziehungsweise abgegrenzt, da sie bei dieser Versuchsreihe nicht von Bedeutung sind. Vor allem die Boost-Möglichkeit und die Nutzbremung wirken sich nicht wesentlich auf den Fahrzeugantrieb aus und bleiben somit unverändert. Der eingesetzte Gleichstrommotor ist Bestandteil des Grundmodells und wird deshalb nicht verändert. Ein Umbau auf einen Drehstrommotor wurde nicht vorgenommen, da Gewicht, Platz, Kosten und Komplexität dagegen sprechen.

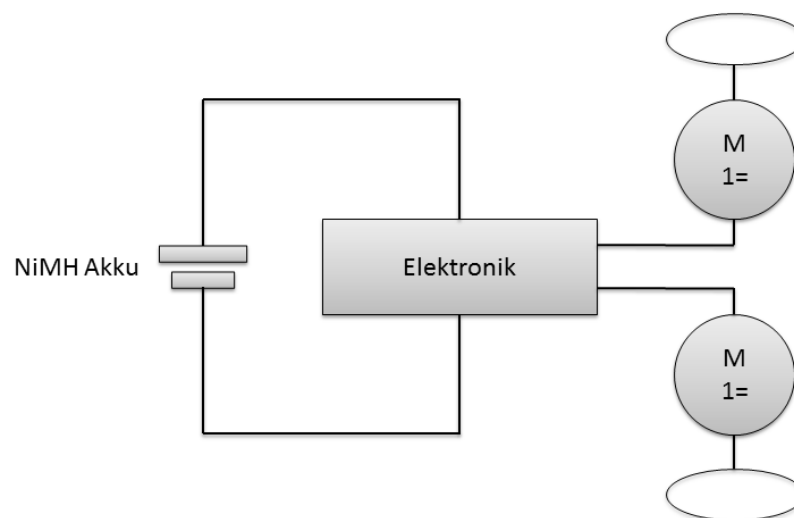


Abbildung 16: Antrieb des Elektromodells

„Der RP6 (siehe Abbildung 17) ist ein kostengünstiger autonomer mobiler Roboter, der von der Firma Arexx Engineering entwickelt wurde. Der Roboter wird komplett aufgebaut geliefert und ist ideal für Erweiterungen ausgelegt. Das Modell kann als Ausgangspunkt für viele interessante Hardware Experimente verwendet werden.

Das Fahrzeug verwendet den leistungsfähigen Mikrocontroller ATMEGA32 von Atmel, der in C programmierbar ist. Die Elektronik und die zwei unabhängigen Antriebsmotoren werden von sechs AA-Standardbatterien versorgt, die unterhalb der Hauptplatine untergebracht sind.

Hervorzuheben sind die hochauflösenden Drehzahlgeber, die für eine präzise Geschwindigkeitsregelung und Wegmessung unabdingbar sind. Weiteres verfügt das Modell über eine Überwachung der Akkuspannung sowie der Motorstromaufnahme. Sechs LEDs und ein zusätzlich angebotenes LCD-Text Display erleichtern die Kommunikation und Überwachung und ermöglichen ein einfaches Debugging im laufenden Betrieb.

Der RP6 ist für anspruchsvollere Anwender gedacht, die sehr gute Erweiterungsmöglichkeiten, bessere Mikrocontroller und mehr Sensoren benötigen.

Es sind bereits einige Erweiterungsmodule erhältlich, mit denen man die Fähigkeiten des Roboters ausbauen kann. Dies ist unter anderem die C-Control Erweiterung MEGA128, ein Erweiterungsmodul mit einem weiteren MEGA32 und natürlich das Lochraster Experimentierboard für eigene Schaltungen, welches auch separat erhältlich ist (man kann mehrere davon auf dem Roboter anbringen).“ Vgl. (Arexx Engineering, 2007) S.6 ff.

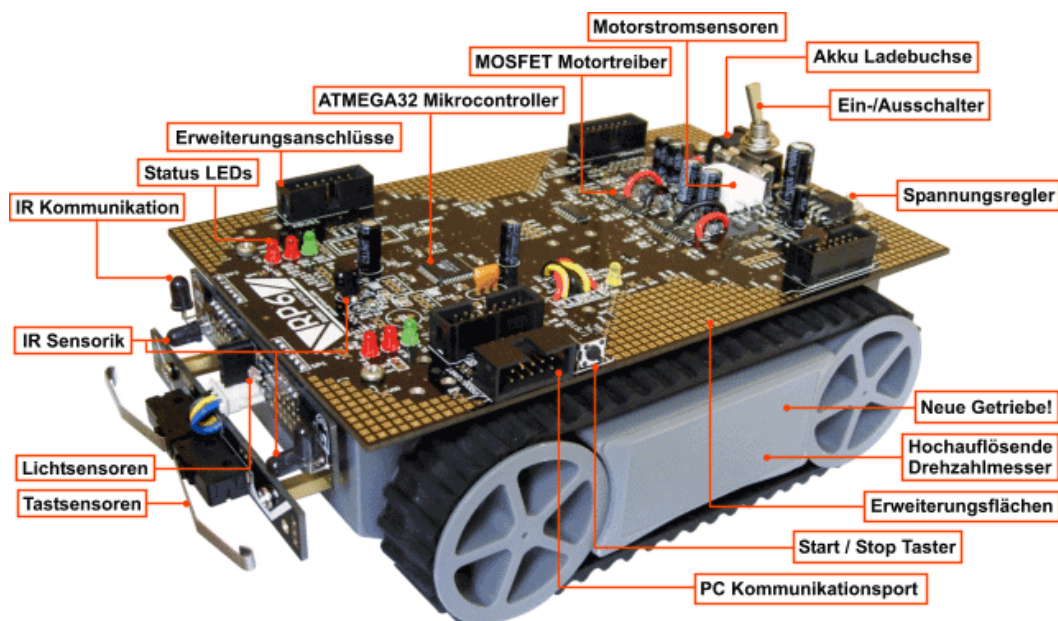


Abbildung 17: RP6 Basis Modell

Quelle: Arexx Engineering (2012)

3.2.2 Hybridmodell

Das Ausgangsmodell für den Hybridumbau ist der Roboter RP6. Die gleichen Abgrenzungskriterien gelten auch bei diesem Modell. Der in Abbildung 15 dargestellte Hybridantrieb wurde näherungsweise nachgebaut (siehe Abbildung 18). In der ersten Umbauphase sind die sechs AA-NiMH Akkus aus dem Fahrzeug entfernt worden. Die Aufgabe der Stromversorgung für Elektronik und Antriebsmotoren übernahm der zusätzlich verbaute Gleichstromgenerator. Außer Acht gelassen wurden hierbei die Hydraulikpumpe, die Ultracaps und die autarke Motorstarteinheit. Nach intensiver Recherche ergab sich, dass im Modellbau kein Dieselmotor verfügbar ist. Benzinmotoren sind erhältlich, die Größe und das Gesamtgewicht sind für den Probetrieb ungeeignet, da die käuflichen Exemplare zu schwer und groß sind. Daher stand nur noch der Nitromotor zur Auswahl, der den Gleichstromgenerator über eine gekoppelte Welle antreiben soll. Basis für den mechanischen Aufbau ist eine Aluminium Grundplatte, die auf dem Roboter aufliegen soll.

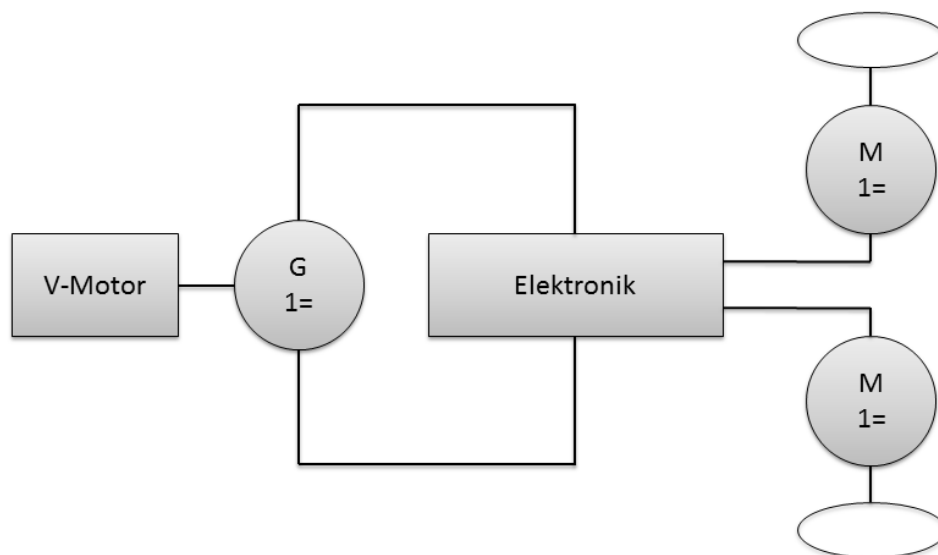


Abbildung 18: Antrieb des Hybridmodells

3.2.3 Modifizierte Version des Hybridmodells

Ausgangsbasis für das modifizierte Hybridmodell sind die im Hybridmodell genannten Eckpunkte. Die Ausnahme ist die Motorstarteinheit, die in weiterer Folge baulich anderweitig in das System integriert werden soll. Damit die Integration der Starteinheit funktionieren kann, muss die Vergaserklappe gestellt und die Glühkerze erwärmt werden. Beim Startvorgang muss der LiPo Akku (siehe Abbildung 19) den Generator mit Strom versorgen, der wiederum über die Kupplung den Verbrennungsmotor starten sollte.

In der zweiten Umbauphase wurden die sechs AA-NiMH Akkus in das Fahrzeug wieder eingebaut. Das im anschließenden Kapitel definierte Systemkonzept wird in dieser Variante auf dem Roboter aufgebaut und in das bestehende Konzept integriert.

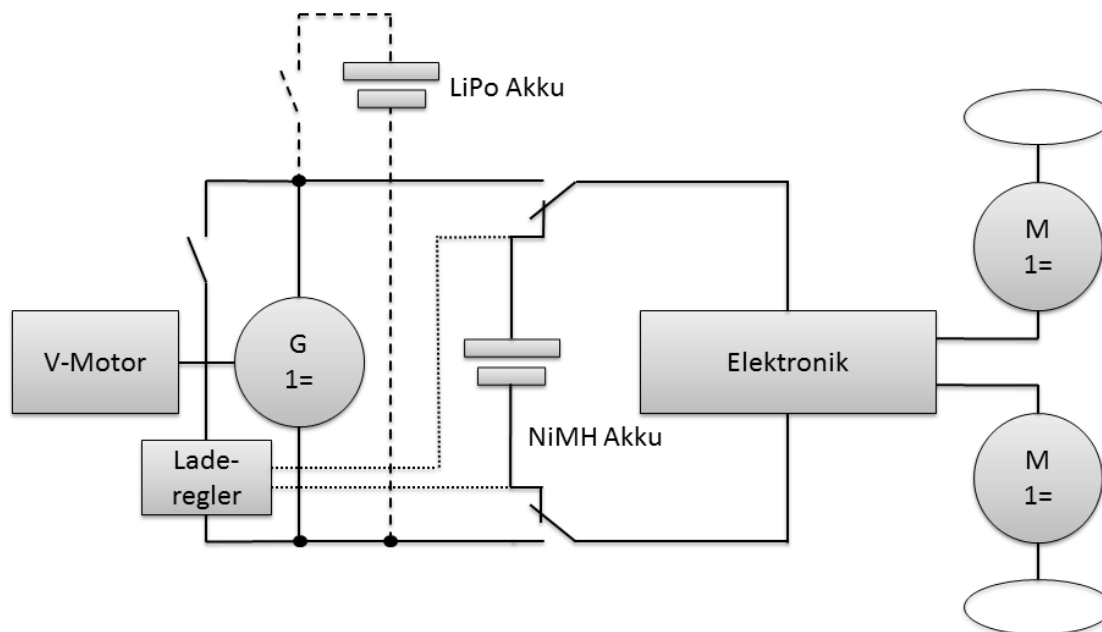


Abbildung 19: Antrieb des modifizierten Hybridmodells

Gegenüber der bestehenden Hybridvariante ist die modifizierte Hybridvariante eine Aufwertung der Hybridklasse. Das bestehende Hybridmodell hat einen seriellen Hybridantrieb mit nicht all den enthaltenen Eigenschaften der Mild-Hybrid Klasse (siehe Abschnitt 3.1.2). Der aufgewertete Hybrid hat zukünftig einen seriellen Hybridantrieb und kann durch die Möglichkeit einer externen Lademöglichkeit über die Ladebuchse in die Plug-In-Hybrid

Klasse eingeordnet werden. Durch die Integration der autarken Motorstarteinheit entfallen die Zusatzkomponenten Anlasser, Blei-Säure Batterie und Lichtmaschine.

4 Systemkonzept

Bevor näher auf das Systemkonzept eingegangen wird, ist es sinnvoll die Wirkungsgrade der einzelnen Modelle zu vergleichen. Die zirkulierende Energie in jedem Modell durchläuft mehrere Umwandlungen, keine davon ist verlustfrei.

4.1 Wirkungsgradgegenüberstellung

Damit die Berechnung der Wirkungsgrade bei jeder Modellvariante ordnungsgemäß durchgeführt wird, müssen die unten angeführten Werte verwendet werden. Folglich wird jede Energieumwandlung und der daraus resultierende Wirkungsgrad genannt:

Verbrennungsmotor mit Nitrogemisch: chemisch \rightarrow thermisch \rightarrow mechanisch = Annahme von 37 %

Generator von Graupner: mechanisch \rightarrow elektrisch = „77 %“ (Graupner.de, 2013)

Akkuladung: elektrisch \rightarrow chemisch = „Bleiakku: 65 %, NiMH Akku: 70 %, LiPo Akku: 90 %“ (siehe Abbildung 3)

Elektromotor: elektrisch \rightarrow mechanisch = Annahme von 90 %

4.1.1 Elektromodell

Das Elektromodell hat einen Akku und zwei Elektromotoren verbaut. Deshalb muss bei der Berechnung des Wirkungsgrades die Umwandlung der Energie für den oben angeführten Elektromotor berücksichtigt werden:

Betrieb: 0,9 (Elektromotor) \rightarrow 90 %

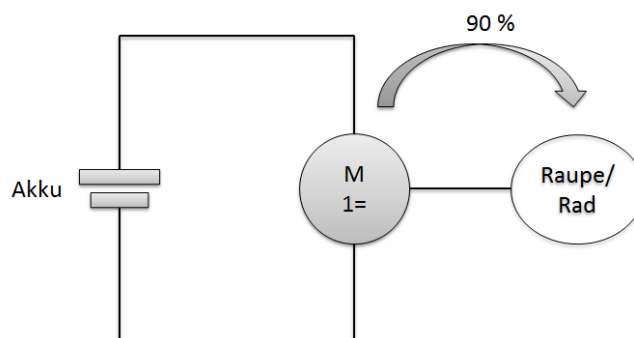


Abbildung 20: Wirkungsgrad Betrieb Elektromodell

Ladung: 0,65 (Blei – Säure Akkuladung) \rightarrow 65 %

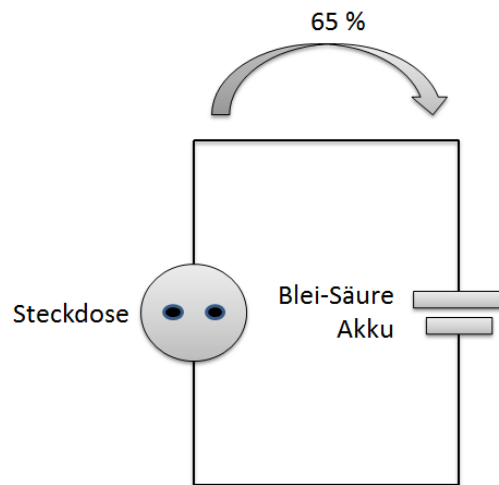


Abbildung 21: Wirkungsgrad Blei-Säure Akkuladung

Das Elektromodell hat einen Wirkungsgrad von 90 %. Ausgehend von der Staplerbatterie (Blei-Säure-Batterie) erhält man bei der Aufladung des Akkus einen Wirkungsgrad von 65 Prozent.

4.1.2 Hybridmodell

Das nachkonstruierte Hybridmodell hat einen Verbrennungsmotor, Generator und zwei Elektromotoren verbaut. Für die Berechnung des Wirkungsgrades müssen die oben zu-treffenden Faktoren ausgewählt werden:

Betrieb: $0,37 \text{ (VM)} * 0,77 \text{ (Generator)} * 0,9 \text{ (Elektromotor)} = 0,256 \rightarrow 25,6 \%$

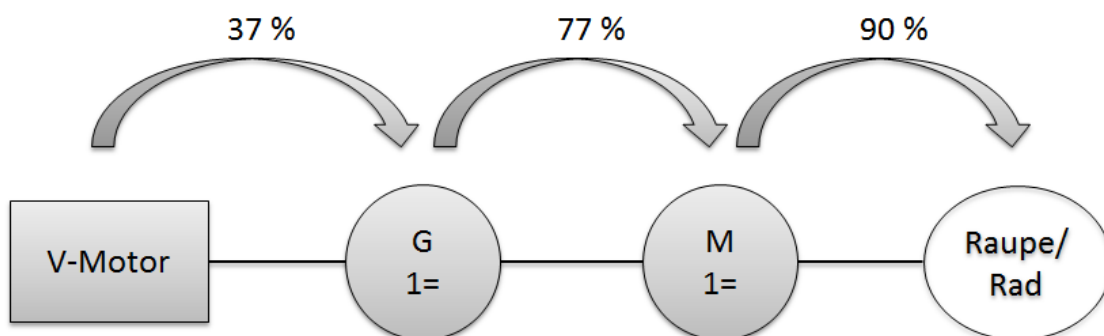


Abbildung 22: Wirkungsgrad Betrieb Hybridmodell

Nach Multiplizierung aller Faktoren, erhält man beim Hybridmodell einen Wirkungsgrad von 25,6 %. Eine Akkuladung gibt es bei diesem Modell nicht.

4.1.3 Modifizierte Version des Hybridmodells

In der modifizierten Version des Hybridmodells sind Verbrennungsmotor, Generator, NiMH Akku, LiPo Akku und zwei Elektromotoren eingebaut. Für die Berechnung des Wirkungsgrades müssen auch hier die oben angeführten Faktoren ausgesucht werden:

Normalbetrieb: 0,9 (Elektromotor) → 90 %

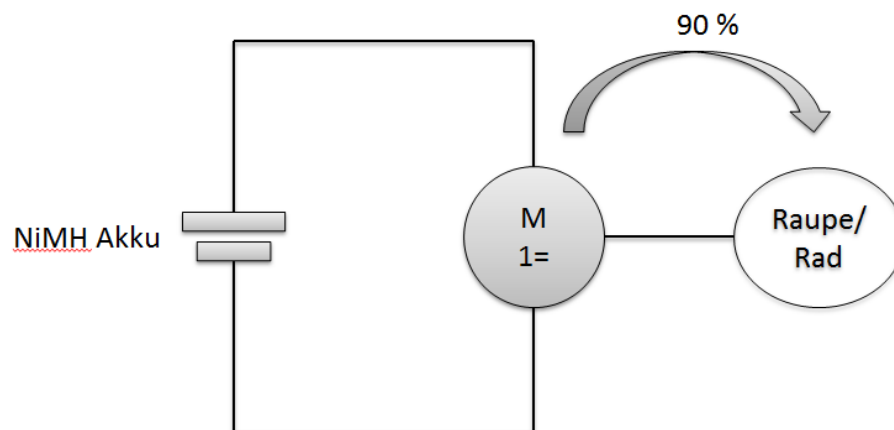


Abbildung 23: Wirkungsgrad Normalbetrieb Mod. V. Hybrid

VM – Betrieb: 0,37 (VM) * 0,77 (Generator) * 0,9 (Elektromotor) = 0,256 → 25,6 %

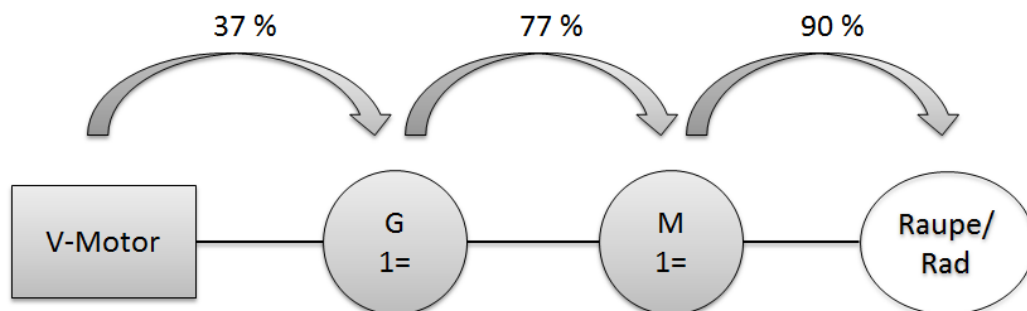


Abbildung 24: Wirkungsgrad VM-Betrieb Mod. V. Hybrid

Ladung Ladestation: 0,9 (LiPo Akkuladung) → 90 %

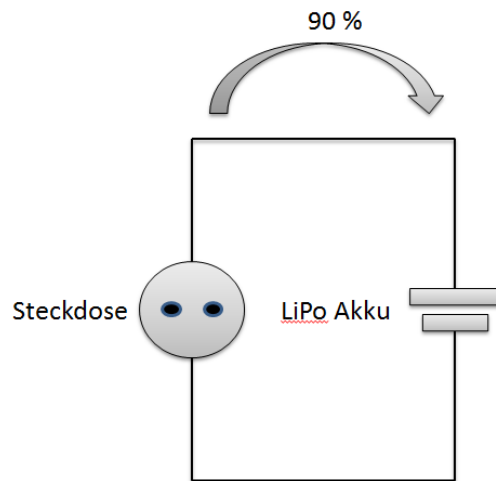


Abbildung 25: Wirkungsgrad LiPo Akkuladung

Ladung Ladestation: 0,7 (NiMH Akkuladung) → 70 %

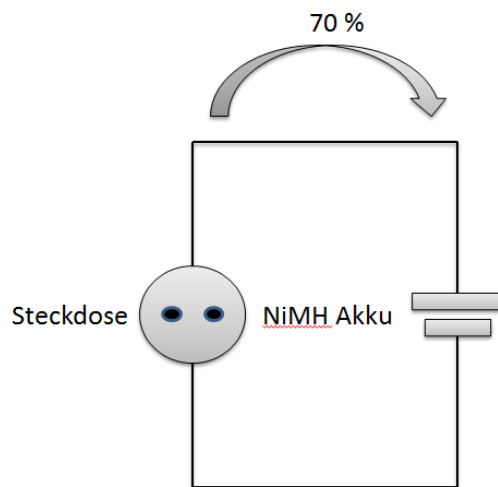


Abbildung 26: Wirkungsgrad NiMH Akkuladung

$$\begin{aligned} \text{Ladung im VM – Betrieb: } & 0,37 \text{ (VM)} * 0,77 \text{ (Generator)} * 0,7 \text{ (NiMH Akkuladung)} \\ & = 0,199 \rightarrow 19,9 \% \end{aligned}$$

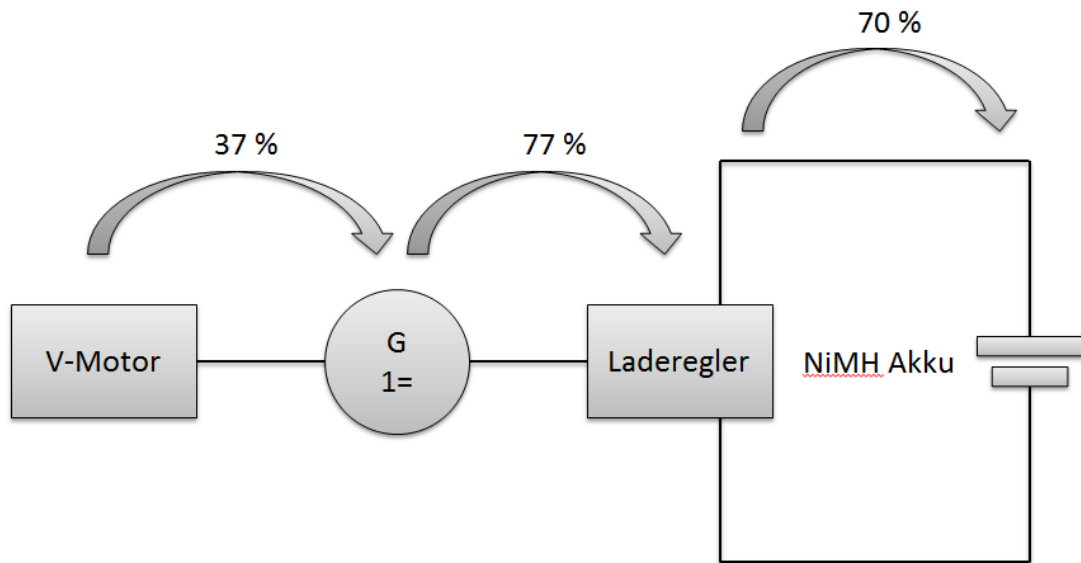


Abbildung 27: Wirkungsgrad VM-Ladung Mod. V. Hybrid

Dieses Modell hat die Betriebsarten Normalbetrieb und VM-Betrieb. Somit ergeben sich nach erfolgter Multiplizierung der Betriebsfaktoren ein Wirkungsgrad für den Normalbetrieb von 90 % und ein Wirkungsgrad für den VM-Betrieb von 25,6 %. Durch den Verbau von zwei unabhängigen Akkus erhält man bei der Ladung in der Station einen Wirkungsgrad von 90 % (LiPo Akku) und 70 % (NiMH Akku). Die Verwendung beider Akkus wird im nachfolgenden Punkt erläutert. Falls die Ladung während des Betriebes erfolgen soll erhält man einen Wirkungsgrad von 19,9 %.

4.2 Vor- und Nachteile

Die gegenübergestellten Wirkungsgradberechnungen deuten auf unterschiedliche verlustbehaftete Umwandlungen hin. Trotz der eindeutigen Ergebnisse haben alle Modelle ihre Vor- als auch Nachteile.

4.2.1 Elektromodell

Im Gegensatz zum Hybridmodell hat das Elektrofahrzeug einen deutlich höheren Wirkungsgrad. Der untergebrachte Akku erhöht das Gewicht des Fahrzeuges, das aber aus der Perspektive des Staplers keinen essentiellen Nachteil mit sich bringt. „Der RX60-35 hat ein Eigengewicht von 5,5 t, eine Motorleistung von 15 kW und eine Tragfähigkeit von 3500 kg.“ Vgl. (Still, 2013) S.2

Eine Gewichtserhöhung hat den Vorteil, dass das Fahrzeug eine höhere Last auf der Gabel transportieren kann und beim Hub nicht umkippt.

Derzeit wird bei Erschöpfung der Akkukapazität der Energiespeicher mithilfe eines anderen Gabelstaplers ausgewechselt. Bei diesem Vorgang muss eine Bereitstellung von anderen Akkus gewährleistet sein. Falls kein geladener Akku verfügbar ist, muss der eingesetzte Stapler in der Ladestation aufgeladen werden. Die Folge daraus ist, dass der weitere Arbeitsvorgang beeinträchtigt wird. Ein weiterer Nachteil ist die vom Stapler eingesetzte Blei-Säure-Batterie, die einen schlechteren Ladewirkungsgrad als die leichtere NiMH-Batterie besitzt.

4.2.2 Hybridmodell

Das Gewicht des Hybridmodells ist deutlich niedriger als beim elektrobetriebenen Stapler, da das Fahrzeug ohne Akku betrieben wird. „Der 4,5 t schwere RX70-35 Hybrid-Gabelstapler hat eine Motorleistung von 38 kW und eine Tragfähigkeit von 3500 kg.“ Vgl. (Still, 2013) S.3

Das Modell verfügt über einen Tank, der vor Fahrbeginn kontrolliert werden sollte. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass das Fahrzeug bei gefülltem Tank unterbrechungsfrei betrieben werden kann. Im Gegensatz zum Elektromodell ist der Hybridstapler von keinem anderen Stapler abhängig.

Der schlechtere Wirkungsgrad ist energietechnisch gesehen ein Minuspunkt. Die mehrfache Energieumwandlung erhöht nicht nur im Fahrbetrieb den Energieaufwand, sondern hat gleichzeitig deutlich höhere Energiekosten zur Folge.

4.2.3 Modifizierte Version des Hybridmodells

Eine verbesserte Form des Hybriden ist aufgrund des verminderten Wirkungsgrades zwingend notwendig. Die im elektrobetriebenen Modell verwendete Antriebsform kann auf die modifizierte Version portiert werden. Es ist hierbei zu beachten, dass das Gewicht wegen der zusätzlichen Aufbauten reduziert werden sollte. Die erste verbesserte Lösung wäre der Einsatz eines NiMH Akkus, der zukünftig die Elektrifizierung gewährleisten wird. Als Starthilfe für den Verbrennungsmotor ist im Modellbau ein zusätzlicher LiPo Akku geplant. Falls es notwendig ist, würde in der zukünftigen Staplerausführung ein Lilon Akku als Starthilfe zum Einsatz kommen. LiPo als auch Lilon Akku haben einen ungefähr gleichen Ladewirkungsgrad. Die Funktionen des bestehenden Hybridmodells werden in der modifizierten Version ebenfalls übernommen. Eine Neuheit ist die gleichzeitige Ladung des NiMH Akkus im VM-Betrieb.

Nachteilig bei dieser Variante ist die Anhäufung mehrerer Komponenten, die für den Fahrzeugaufbau notwendig wären. Ein weiterer Nachteil ist die Komplexität der Leistungselektronik.

4.2.4 Konklusion

Das Funktionsprinzip (siehe Abbildung 15) des derzeitig eingesetzten Hybridstaplers ist im Bereich zwischen Mikro- und Mild-Hybrid einzuordnen. Aufgrund der hohen Motorisierung kam die Überlegung auf, eine höhere Hybridvariante zu entwickeln. Das vorgestellte Konzept hat im Wesentlichen zwei Betriebsarten und zwei Zwischenzustände. In Tabelle 4 sind beide Betriebsarten (Normalbetrieb, VM-Betrieb) und die Zwischenzustände (VM-Start, VM-Stopp) eingetragen. Einzelne Aufgaben sind hier ebenfalls aufgelistet.

Normalbetrieb	VM-Start	VM-Betrieb	VM-Stopp
Fahrzeugversorgung durch NiMH Akku	VM-Temperatur überprüfen	VM-Temperatur überwachen	NiMH Akkuladung stoppen
	Vergaserklappe stellen durch Servomotor	Generatorspannung überwachen	
	Glühkerzenerwärmung	Drehzahl überwachen	
Erkennung der Akku-Entladung	LiPo Akku steuert E-Motor an	Einschalten der Lüfter	Fahrzeugversorgung durch VM abschalten
		Fahrzeugversorgung durch VM	
	Überprüfung Drehzahl	NiMH Akkuladung durch VM	Abschalten der Lüfter
		Erkennung des Akkuladezustandes	Vergaserklappe schließen durch Servomotor

Tabelle 4: Betriebsarten/Zwischenzustände modifizierte Hybridversion

Eine ausführlichere Beschreibung der einzelnen Aufgaben befindet sich in Kapitel 5. Die passende visuelle Darstellung zur Tabelle 4 findet man in Abbildung 28.

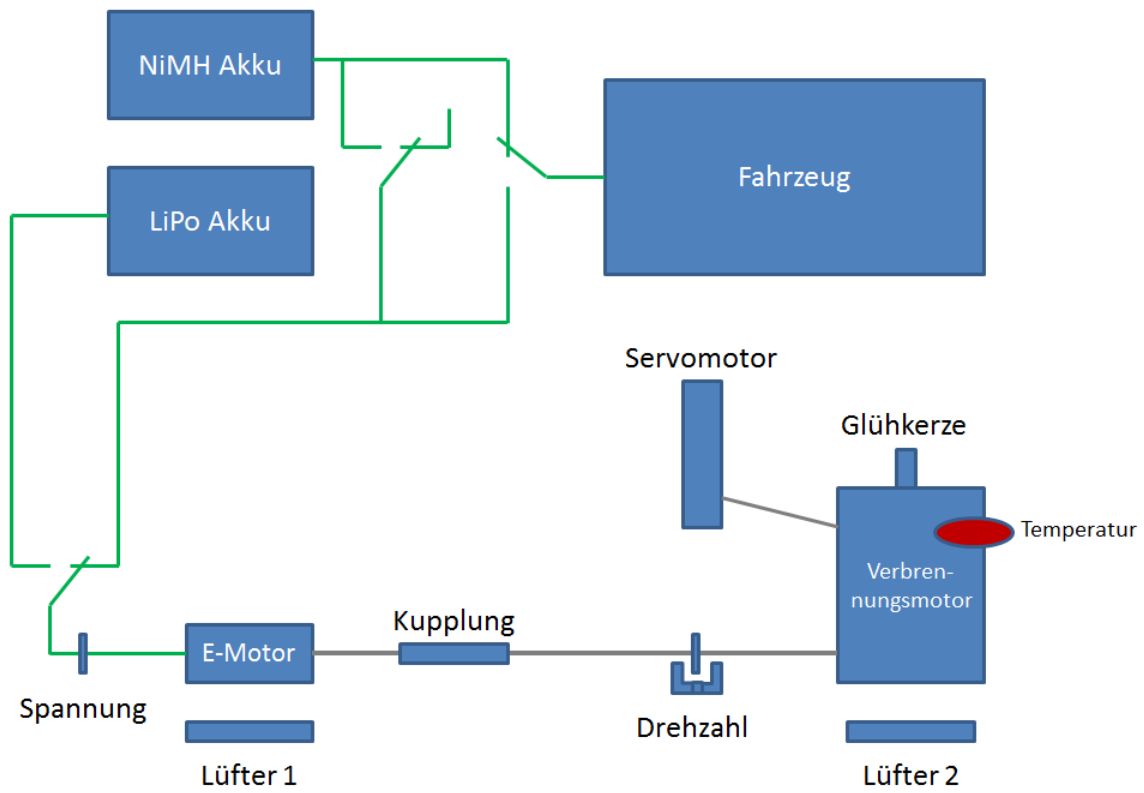


Abbildung 28: Modifizierte Hybridschaltung

5 Systementwicklung

5.1 Hardwareentwicklung

Das Kapitel 3 ging bereits auf die Nachbildung der Staplermodelle ein, das ebenfalls die funktionellen Abgrenzungen der Umbauten beschreibt. Kurz zusammengefasst gibt es das Grundmodell (Elektromodell), die erste Umbauphase (Hybridmodell) und die zweite Umbauphase (Modifizierte Version des Hybridmodells), die zu realisieren waren. Für die Entwicklung des Konzeptes wurde ein Budget von 1000 Euro festgesetzt.

5.1.1 Mechanischer Aufbau

Eine Funktionsbeschreibung der jeweiligen Umbaustufen soll im Abschnitt 5.1.1 nicht Thema sein, es werden lediglich der Aufbau und das Einfahren des Verbrennungsmotors betrachtet.

5.1.1.1 Grundmodell

Die am Grundmodell befindlichen Komponenten sind fixe Bestandteile des Fahrzeuges und wurden unverändert übernommen. Somit hat das Raupenfahrzeug ein Eigengewicht von 742 g. Abbildung 17 zeigt den originalen Zustand.

5.1.1.2 Erste Umbauphase

Bei der Komponentenzusammenstellung fiel die Wahl auf den Verbrennungsmotor mit der geringsten erhältlichen Leistung von 1100 W. Der Leistungsbedarf beträgt in der ersten Umbauphase zirka 5 W und in der zweiten Umbauphase zirka 60 W. Die Komponenten Luftfilter, Motorträger, Resonanzrohr wurden auf den Nitromotor abgestimmt. Der Hersteller des Verbrennungsmotors empfahl für das Einfahren des Motors eine R5 Glühkerze, die besonders für einen hohen Nitroanteil und hohe Drehzahlen geeignet ist. Außerdem ist die kalte Glühkerze besonders für den Sommerbetrieb geeignet. Der 125 ml Tank enthielt den Treibstoff, der sich aus 15 % Nitromethan, Methanol und Schmieröl zusammensetzt. Die Ansteuerung des Servomotors erfolgte in der zweiten Umbauphase. Diese Maßnahme hatte den Vorteil, dass keine Mikrocontrollererweiterung und keine zusätzliche Programmierarbeit erforderlich waren. Durch die Möglichkeit, den Servomotor manuell nachstellen zu können, erzielte man beim Einfahren des Motors einen weiteren Nutzen. Für diese Art der Verstellung war die Befestigung eines Gestänges, das von der Vergaserklappe bis zum Servomotor führt, notwendig. Durch die Montage des Gestänges konnte der Servomotor auch im ausgeschalteten Zustand die Position der Vergaserklappe problemlos halten. Die Wahl der Kupplung fiel anfangs deshalb auf die Zentrierkupplung (siehe Abbildung 36), da kurze hohe Drehzahlen durch die Nachführung der O-Ringe un-

terdrückt werden können. Der 12 VDC Motor war wegen der Blockierstromaufnahme von 40 A, seiner Stromaufnahme von 7 A und seiner Leerlaufdrehzahl von 17200 U/min die erste Wahl. Im Generatorbetrieb stellt der Motor die Verbraucherleistungen von 5 W und 60 W problemlos zur Verfügung. Die in Abbildung 29 dargestellten Komponenten Glühkerzenstecker und Lüfter wurden in der zweiten Umbauphase angesteuert. Deshalb erfolgte die Motorerwärmung über einen separaten NiMH Akku Glühkerzenstecker.

Bevor die Konstruktion auswertbare Ergebnisse liefern konnte, musste der Verbrennungsmotor eingefahren und optimal eingestellt werden. Für das Einlaufen des Motors war die Verwendung der vom Hersteller (siehe Conrad, 2013) empfohlenen Treibstoffe und Werkzeuge unerlässlich. Ebenso sind die empfohlenen Motorlaufzeiten, Drehzahlbegrenzungen, Höchsttemperaturen und Intervalle eingehalten worden.

Die auf der 3 mm starken Aluminiumplatte befestigten Bauteile (Verbrennungsmotor, Motorträger, Luftfilter, Kupplung, E-Motor, Resonanzrohr, Servomotor, Tank, Glühkerzenstecker und Lüfter) wurden vor der Anordnung in AutoCAD gezeichnet. Beim Konstruieren der AutoCAD Zeichnung legte man Augenmerk auf eine kompakte Anordnung der Bauteile. Die Planung und der anschließende Verbau von zusätzlichen Ventilatoren war nötig, um bei den wärmeproduzierenden Komponenten einen Hitzestau zu vermeiden.

Der in Abbildung 29 durchgeführte Aufbau wurde mithilfe von 8 Distanzbolzen und 4 Schwingungsdämpfern (siehe Abbildung 32) auf das Grundmodell montiert.

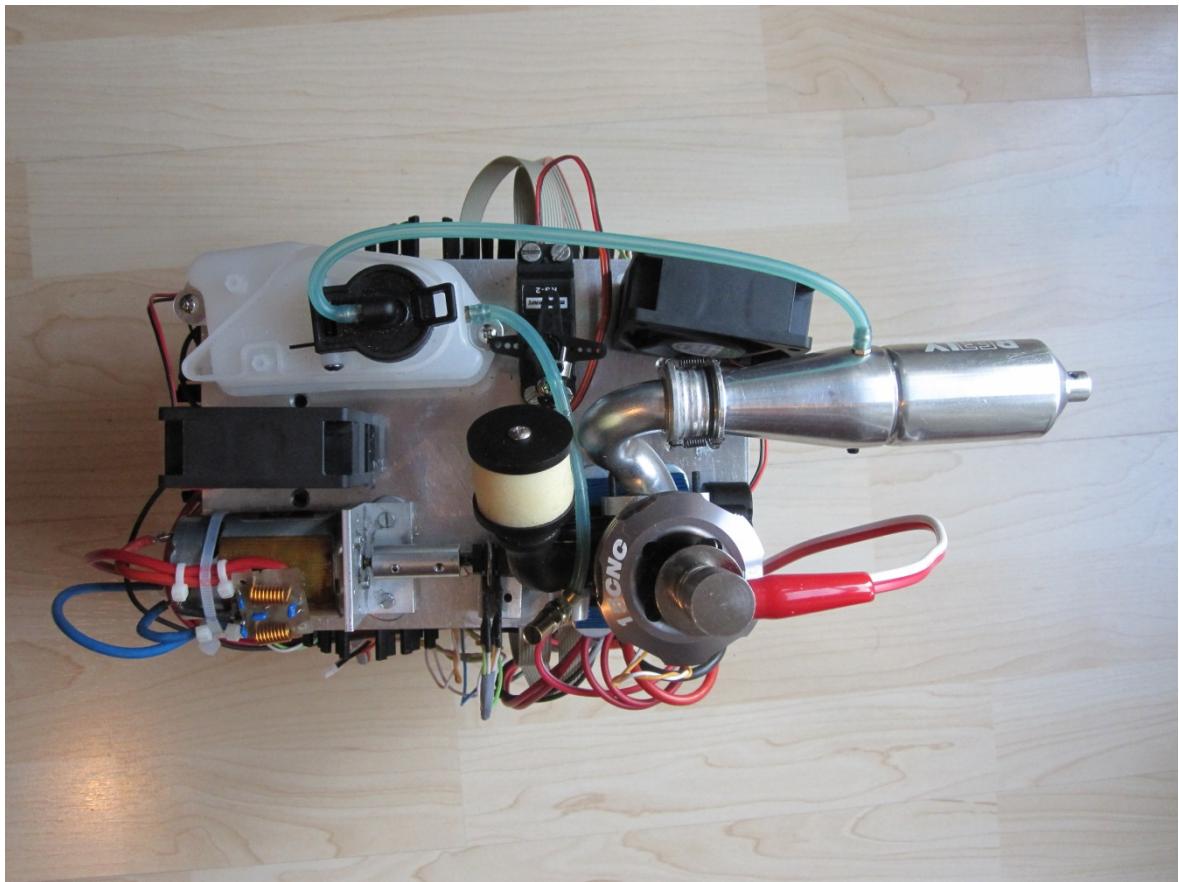


Abbildung 29: Aufbau der ersten Umbauphase

Nach dem ersten Umbau ergab sich beim RP6 ein Gesamtgewicht von 1786 g.

5.1.1.3 Zweite Umbauphase

Nach sorgfältiger Überlegung wurden die zusätzlich bestückten Platinen, die im Abschnitt Elektronikentwurf erläutert sind, in den Konstruktionsaufbau integriert. Dazu zerlegte man den bestehenden Hybridaufbau und fügte die Platinen mittels Distanzbolzen zwischen Grundmodell und Hybridaufbau ein. Um die Gewichtsverteilung zu optimieren ist im vorderen Bereich der Ebene 1, der zusätzlich benötigte LiPo Akku platziert worden. Ebenfalls wurde die punktuelle Belastung der Platinen durch zusätzliche 4 Distanzbolzen und 2 Schwingungsdämpfern reduziert und dadurch gleichmäßig verteilt. Somit ergab sich ein Gesamtgewicht von 3372 g. Der Aufbau des modifizierten Hybridprototyps ist in Abbildung 30, Abbildung 31 und Abbildung 33 dargestellt.

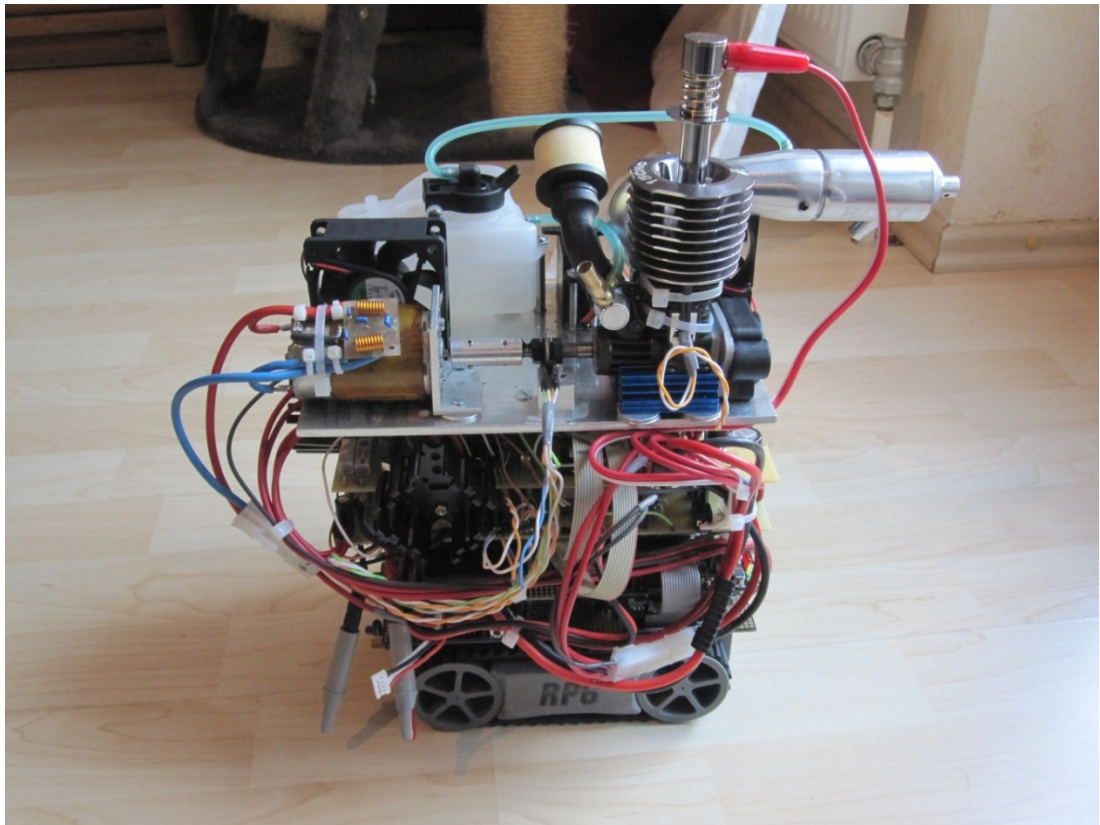


Abbildung 31: Hybridaufbau zweite Umbauphase – seitliche Ansicht

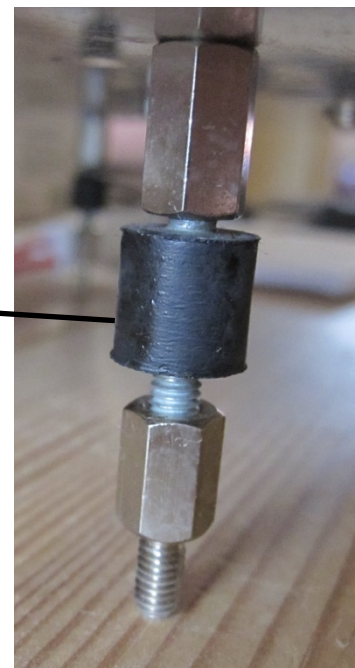
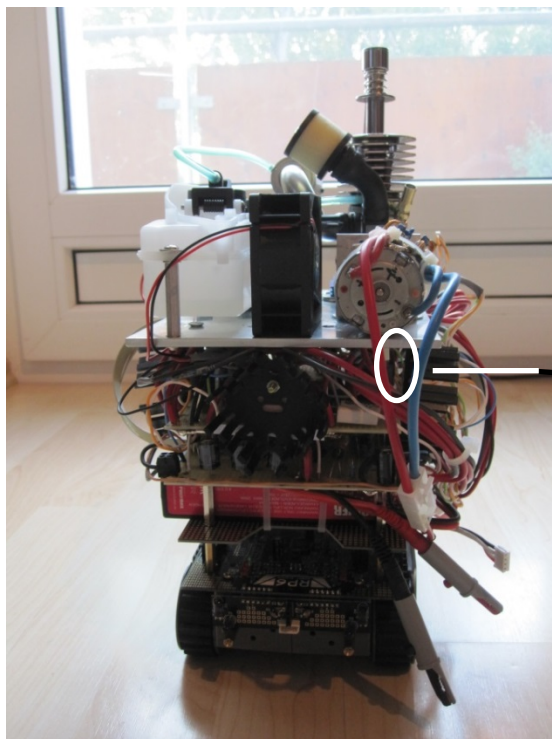


Abbildung 32: Schwingungsdämpfer mit Distanzbolzen

Abbildung 33: Hybridaufbau zweite Umbauphase – vordere Ansicht

5.1.1.4 Prüfstand

Der RP6 ist ein Raupenfahrzeug und bewegt sich im Betrieb vorwärts oder rückwärts. Da eine Auswertung am Computer erfolgen soll, muss sich der Roboter in der Nähe des Rechners befinden. Vom Freilauf der Raupen ist abzuraten, da es wegen des außer Acht Lassens des Gewichtes unumgänglich zu einer Ergebnisverfälschung kommt. Um plausible Messergebnisse zu erhalten war es erforderlich einen auf Rollen gestützten Stand zu entwickeln. In Abbildung 34 erkennt man den selbst gebauten Prüfstand. Aus Platzgründen mussten beim im Prüfstand enthaltenen Roboter (siehe Abbildung 35) die Tastsensoren abgenommen werden.



Abbildung 34: Prüfstand

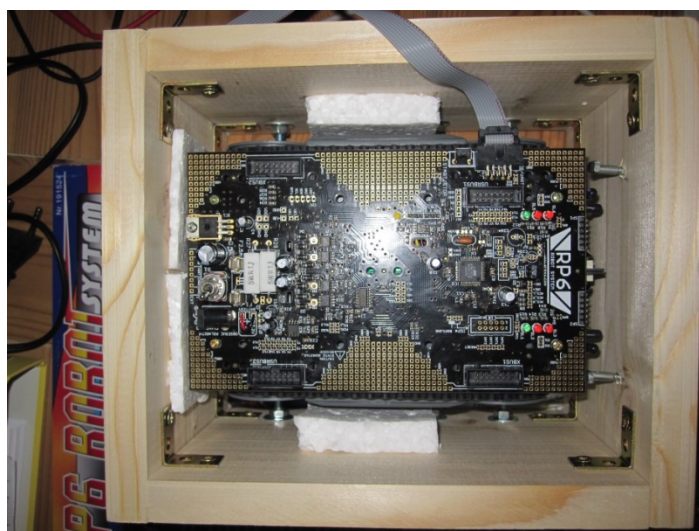


Abbildung 35: Prüfstand mit RP6

5.1.2 Elektronikentwurf

5.1.2.1 Elektromodell

Den Originalzustand des RP6 behielt man beim Elektromodell bei. Dennoch wurden vor der ersten Umbauphase alle Sensoren und Features auf Funktion geprüft. Die dafür verwendeten Programme sind im Abschnitt Softwareentwicklung beschrieben.

5.1.2.2 Hybridmodell

Aufgrund der nicht in Betracht gezogenen Motorstarteinheit, mussten die vom Verbrennungsmotor benötigten Starteinstellungen manuell vorgenommen werden. Zuerst musste mit einem elektrischen Rotorstarter, beziehungsweise Seilzugstarter bei geschlossener Vergaserklappe, kurz die Kurbelwelle auf und ab bewegt werden, um die Treibstoffleitung mit Kraftstoff zu füllen. Danach wurde die Vergaserklappe auf die halbe Öffnung gestellt und der Glühkerzenstecker aufgesteckt. Nach mehrmaliger Betätigung des Rotorstarters beziehungsweise Seilzugstarters startete der Motor. Anschließend wurde die Motordrehzahl reduziert und die Temperatur überprüft. Um hohe Motortemperaturen zu vermeiden, stellte man provisorisch einen Standventilator auf.

Der Verbrennungsmotor wurde bei dieser Hybridvariante im Drehzahlbereich von 7000 U/min betrieben. Dabei erreichte der eingelaufene Motor eine Durchschnittstemperatur von 91,5 °C. Die Kopplung vom Nitromotor zum Generator gewährleistete die Zentrierkupplung (siehe Abbildung 36), die außenliegend zwei gegenüberliegende O-Ringe befestigt hatte. Durch die Montage der O-Ringe stellte man sicher, dass im Generatorbetrieb kurzzeitige Höchstdrehzahlen unterdrückt werden können.



Abbildung 36: Zentrierkupplung

Aufgrund von Spannungsschwankungen im Generatorbetrieb, die sich trotz des Entstörfilters im Bereich zwischen 8,6 und 9,6 Volt einpendelten, musste als kurzzeitige Pufferung ein 1000 µF Elko dazwischengeschaltet werden. Aus Kostengründen wurde bei diesem Aufbau als Spannungsreduzierung auf 8 Volt Versorgungsspannung bewusst ein Festspannungsregler gewählt. Gegenüber dem Schaltregler sinkt die Komplexität der ausgeführten Schaltung. Außerdem hat man den Vorteil, dass der Verbrennungsmotor keine höhere Drehzahl benötigt, um die zu liefernde Generatorspannung zu erreichen. Zusätz-

lich beansprucht die Schaltung wenig Platz auf der Platine. Die dementsprechende Schaltung ist in den Anlagen, Hybridmodell vorzufinden.

Bevor das Tankminimum erreicht wurde, musste für das Abstellen des Motors die Vergaserklappe geschlossen werden.

5.1.2.3 *Modifizierte Version des Hybridmodells*

Der erste Schritt in dieser Umbauphase war aufgrund der vielen benötigten Ein- und Ausgänge eine Mikrocontroller-Erweiterung. Außerdem erschien es sinnvoll das Hybridsystem, inklusive der integrierten Startmöglichkeit, weitgehend autonom arbeiten zu lassen. Eine zum Roboter passende Erweiterung war der M128 Erweiterungssatz (siehe Abbildung 37).

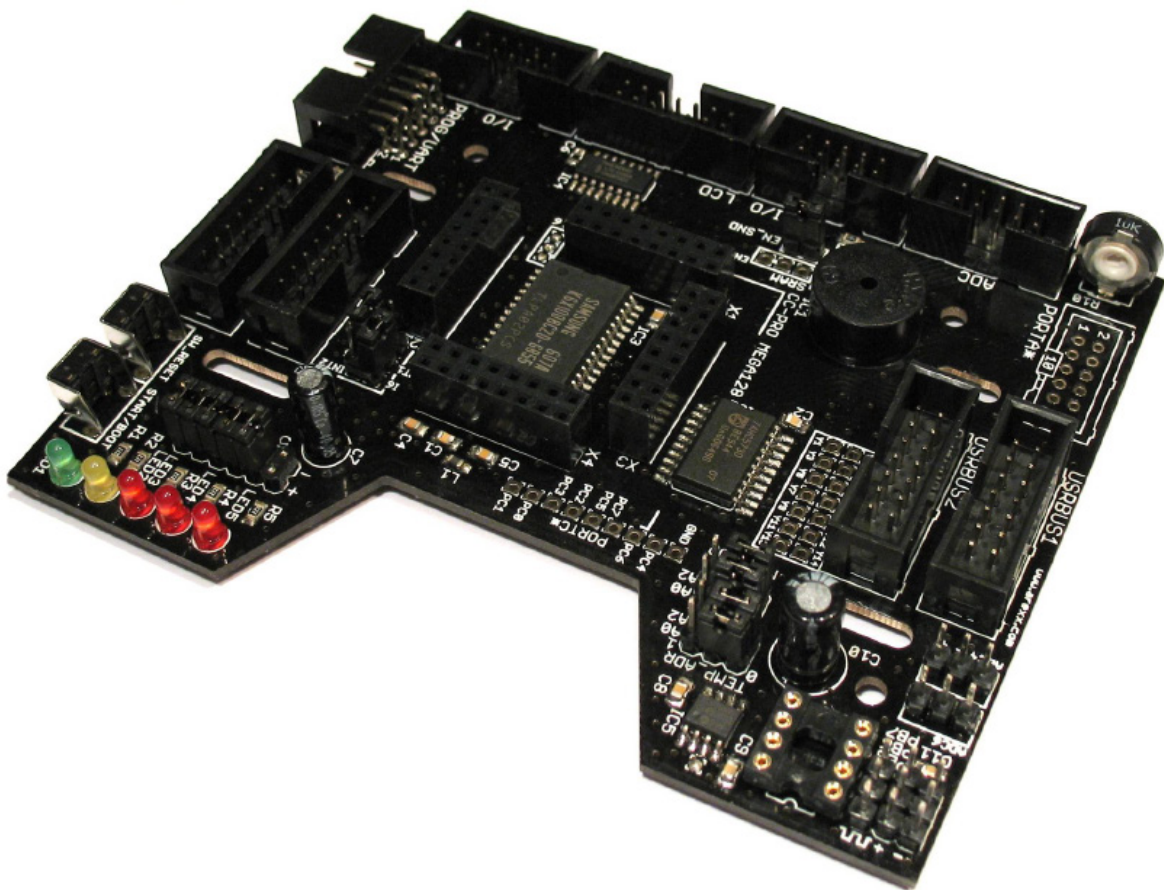


Abbildung 37: M128 Erweiterungssatz

Quelle: Arexx Engineering (2012)

Auf dem Erweiterungsboard wurde ein MEGA128 RISC Mikrocontroller von ATMEL aufgesteckt. Bei der ersten Inbetriebnahme testete man alle Sensoren und Features auf Funktion. Die eingesetzten Programme sind im Abschnitt Softwareentwicklung beschrieben.

Die in Tabelle 4 dargestellten zwei Betriebsarten und zwei Zwischenzustände enthalten eine stichwortartige Aufgabeneinteilung, die wie folgt funktioniert:

Im Normalbetrieb wird das Fahrzeug anfangs mit dem NiMH Akku betrieben. Sobald die Akkuspannung auf ein Minimum von 7 V abfällt, reagiert der Mikrocontroller mit dem Zwischenzustand VM-Start.

Der Zustand VM-Start beginnt mit dem Einschalten der zusätzlichen Stromversorgung. Somit wird für die zusätzlich entwickelten Schaltungen, eine Spannung freigegeben, die alle Bauteile mit Energie versorgt. Anschließend wird die VM-Temperatur überprüft und die Vergaserklappe über einen Servomotor auf die Position der Standgaseinstellung gestellt. Danach steuert der Mikrocontroller die Relais K2, K3 an, die in weiterer Folge die LiPo Akkuspannung für die eingebundene Starteinheit freigegeben. Darauf folgend wird der Step-Down Konverter für die Glühkerzenansteuerung aktiviert. Nach einer Vorwärmdauer des Verbrennungsmotors von 5 Sekunden steuert der Mikrocontroller ein Relais an, das in weiterer Folge den Elektromotor über den LiPo Akku startet. Anschließend wird die Motordrehzahl, anhand einer auf der Welle befindlichen Lochscheibe, mit dem zugehörigen, optischen Sensor kontrolliert. Durch die Ermittlung der Drehzahl kann sichergestellt werden, dass der Motor tatsächlich läuft. Hierbei sollte die Drehzahl bei ca. 6000 Umdrehungen pro Minute liegen. Ist der Verbrennungsmotor erfolgreich gestartet, werden die Glühkerzenansteuerung, E-Motor Ansteuerung und die Spannungserhöhung für den E-Motorstart deaktiviert.

Falls die Drehzahl unter der Solldrehzahl liegt, muss der Vorgang solange wiederholt werden bis die Wiederholungsanzahl von 5 erreicht worden ist. Nach der Überschreitung der Wiederholungszahl führt der Mikrocontroller den Abbruch des Programms durch.

In der Betriebsart VM-Betrieb wird die Motortemperatur permanent überwacht. Als Sicherheitsmaßnahme wird der Verbrennungsmotor bei Erreichen der Temperatur von mehr als 130°C durch das Schließen der Vergaserklappe sofort abgestellt.

Im Anschluss wird die Generatorspannung gemessen. Bei zu geringer Spannung öffnet sich die Vergaserklappe, um die Drehzahl des Motors zu erhöhen. Das Zusammenspiel von Generatorspannung, Drehzahl und Temperatur muss während dieser Betriebsart dauerhaft funktionieren. Die optimalen Einstellungen für Generatorspannung, Drehzahl und Temperatur sind 12 VDC, 15.000 U/Min und 120°C Betriebstemperatur. Bevor die elektrische Last von der Generatorspannung gespeist wird, müssen beide Ventilatoren eingeschaltet werden. Danach erfolgt die Aktivierung des Step-Down Konverters für die Spannungsreduzierung. Im Zuge des Einschaltens sind die Versorgungen vom NiMH Ak-

ku und die vom Generator gelieferte Energie, über die Spannungsreduzierung aktiv. Im darauf folgenden Schritt steuert der Mikrocontroller das für die Akkuladung vorgesehene Relais an. Dadurch wird der erschöpfte NiMH Akku über den Laderegler geladen. Gleichzeitig wird die NiMH Fahrzeugversorgung weggeschaltet. Die Versorgung des Fahrzeuges erfolgt nur noch über den Generator. Die Akkuladung wird über den Fastcharge Eingang des NiMH-Ladereglers in den Mikrocontroller eingelesen und überwacht. Sobald der Laderegler signalisiert, dass der Akku nicht mehr Fastcharge lädt, wird in den VM-Stopp Zustand übergegangen.

Der Zustand VM-Stopp startet mit dem Abschalten der Akkuladung, wodurch wiederum beide Versorgungen aktiv sind. Nach der Drosselung der Motordrehzahl wird der Step-Down Konverter für die Spannungsreduzierung abgeschaltet. Weiteres werden die beiden Lüfter abgestellt. Für das Abstellen des Verbrennungsmotors wird die Vergaserklappe komplett geschlossen. Im letzten Schritt wird die zusätzliche Stromversorgung deaktiviert.

Das Fahrzeug befindet sich wieder im Normalbetrieb und der Zyklus beginnt erneut. Ein Laden über die Steckdose ist bei diesem Vehikel ebenfalls möglich. Für den NiMH Akku ist die Aufladung über die standardmäßige Ladebuchse vorgesehen. Der LiPo Akku benötigt für die Netzladung ein dazwischen geschaltetes Balance Ladegerät.

Die fundamentalen Überlegungen des Funktionsprinzips wurden anhand elektronischer Schaltungen realisiert. Um die Verlustleistung möglichst gering zu halten, ist die Schaltung „zusätzliche Stromversorgung“ entwickelt worden. Dabei wird die zusätzlich verbaute Elektronik nicht permanent mit Strom versorgt. Die Überwachung der Motordrehzahl, der Spannungsmessung nach dem Generator und der VM-Temperatur sind für die Regelung des VM-Betriebes wesentliche Faktoren. Der Verbau des zusätzlichen LiPo Akkus war wegen der hohen benötigten Ströme beim VM-Start erforderlich. Der Akku versorgt erst nach der Spannungsfreigabe die Glühkerze mit 5 A und anschließend wird der E-Motor betrieben (Stromaufnahme 7 A). Um einen Hitzestau zu vermeiden war eine Schaltungsentwicklung für die Kühlung der wärmeproduzierenden Komponenten unverzichtbar. Um Energie zu sparen wurde bei den Spannungsreduzierungen „Spannungsreduzierung VM-Betrieb“ und „Glühkerze Ansteuerung“ jeweils eine Step-Down Wandler Schaltung entwickelt. Somit wird die Verlustleistung reduziert und der Wirkungsgrad der Schaltung verbessert.

Bis auf den NiMH-Laderegler sind alle Bauteile gemäß den Datenblättern zu Schaltungen dimensioniert worden. Die Basisschaltung des NiMH-Ladereglers stammt aus dem Elektor Heft Ausgabe 415 aus dem Monat Juli, Jahr 2005. Allerdings musste die Schaltung an die Bedürfnisse des Hybriden angepasst und modifiziert werden. Konstruiert wurden die Entwürfe mithilfe des Programms Eagle. Die entsprechenden Schaltungen sind in den Anlagen, Modifizierte Version des Hybridmodells zu finden.

Alle Schaltungen wurden auf einem Breadboard aufgebaut, verdrahtet und getestet. Die Ausgangsströme des Mikrocontrollers simulierte man mit einem regelbaren Netzgerät.

Gleichzeitig sind die benötigten Spannungen mithilfe von Akkus zur Verfügung gestellt worden.

Zusätzlich wurde bei der NiMH-Laderegler-Schaltung die Ladedauer und die daraus resultierende Akkukapazität untersucht. Die Auswertung ist im Kapitel 6 zu finden.

Für den Platinen-Aufbau sind Epoxyd-Platinen mit vorgefertigten Lötstreifen und einem Rastermaß von 2,54 mm verwendet worden. Bei den Schaltungen mit mehr als 3 A Laststrom wurden die Leiterbahnen mit 2,5 mm² feindrähtigen Kupferadern verstärkt um die Erwärmung der Leiterbahnen zu verringern.

5.2 Softwareentwicklung

5.2.1 Elektromodell

Bevor das Basismodell für Testzwecke zum Einsatz kam, mussten alle Sensoren und Funktionen überprüft werden. Dazu lieferte der Hersteller ein Programm namens „RP6 Loader“. Nach dem Starten des Programms wurde die zugehörige Hex Datei über die Schnittstelle in den Mikrocontroller eingespielt. In weiterer Folge führte man alle Selbsttests aus.

Der Roboter kann nach dem Einspielen eines Programms autonom betrieben werden. Die Steuerung über den PC ist dabei nicht notwendig. Um ein Programm auf die Bedürfnisse des Benutzers anzupassen, muss mit der mitgelieferten Entwicklungsumgebung WinAVR, die den Quelltexteditor „Programmers Notepad 2“ enthält, programmiert werden. Der Quellcode ist in der Programmiersprache C geschrieben.

Um dem Ziel des nachgebauten Stapler-Originalmodells näher zu kommen, musste ein Programm implementiert werden, das über eine steuerbare Applikation den Roboter bedienen konnte. Dazu wurde das Programm „RP6 Remotrol 1.3“ verwendet (siehe Abbildung 38). Programminformationen sind im Literaturverzeichnis abrufbar (RP6 Remotrol 1.3).

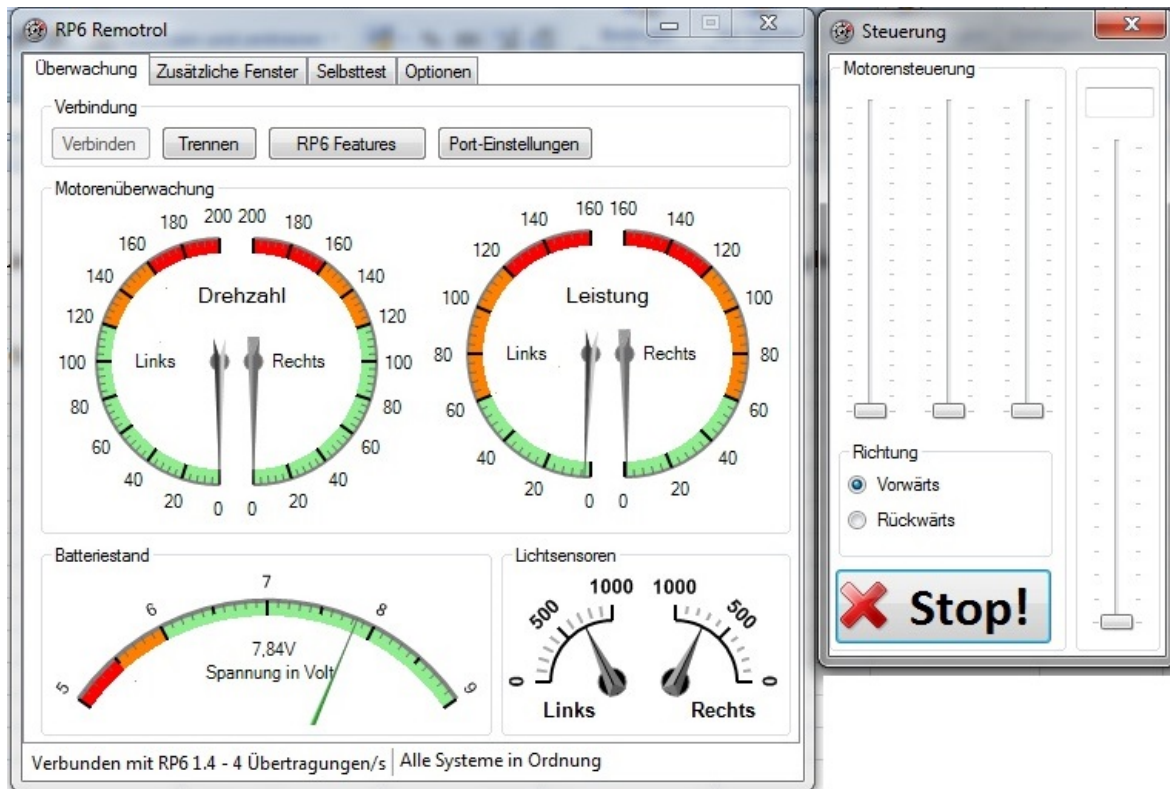


Abbildung 38: RP6 Remotrol 1.3

Das in C# programmierte Opensource Fernsteuerungsprogramm enthielt auch die dazugehörige Firmware für den RP6. Damit das Zugreifen via PC auf Maschinenebene erfolgen konnte, spielte man die Firmware mittels Hex Datei über den RP6 Loader ein. Um die Zuverlässigkeit des Programms zu gewährleisten, führte man auch bei dieser Applikation alle Selbsttests durch.

Außerdem nahm man einen zusätzlichen Stressbelastungstest am Fahrzeug vor und konnte somit die maximale Stromaufnahme ermitteln. Dabei ergab sich nach dem Einschalten aller 6 Leds und der Einstellung der Motorsteuerungsregler auf Vollast ein maximaler Stromverbrauch von 470 mA.

5.2.2 Hybridmodell

In dieser Umbauphase verwendete man die gleichen Programme wie im vorherigen Abschnitt. Wie schon im Abschnitt 5.1.2.2 erwähnt wurde, musste der Startvorgang des Verbrennungsmotors manuell durchgeführt werden um die Stromzufuhr des RP6 sicherzustellen.

Softwareseitig waren keine Änderungen notwendig, da das Fernsteuern des Fahrzeuges bereits möglich war.

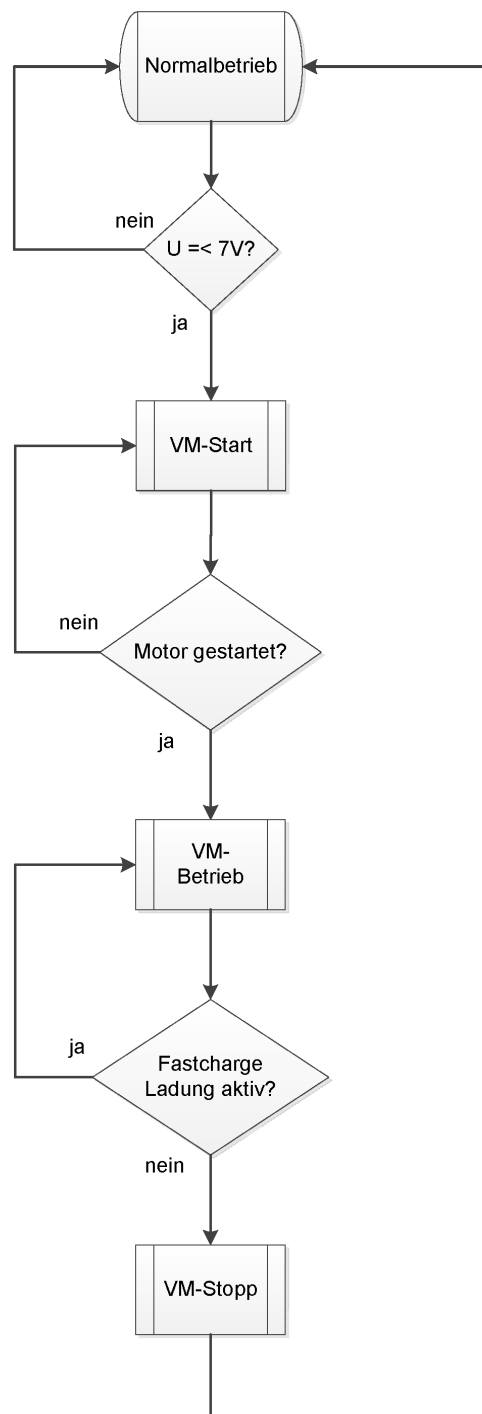


Abbildung 40: Ablaufdiagramm Gesamtübersicht

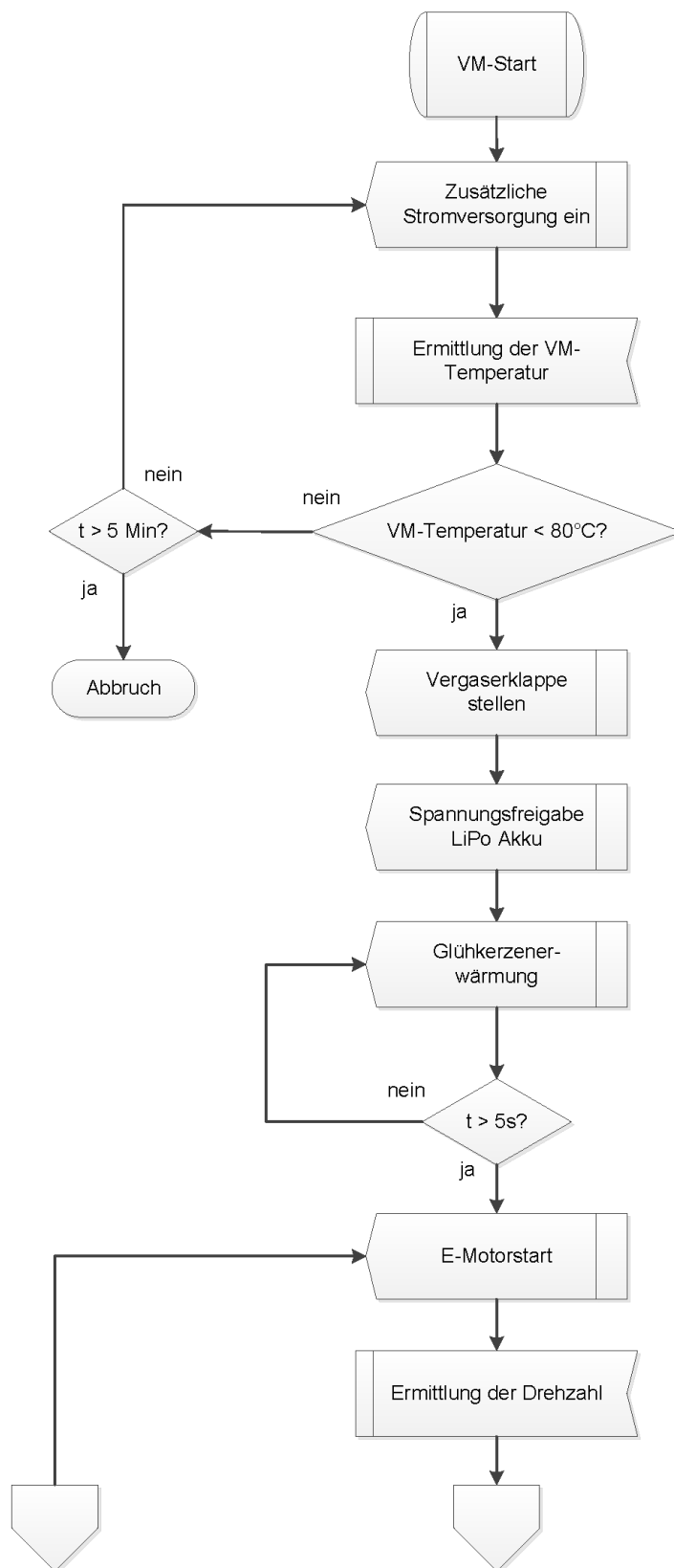


Abbildung 41: Ablaufdiagramm VM-Start

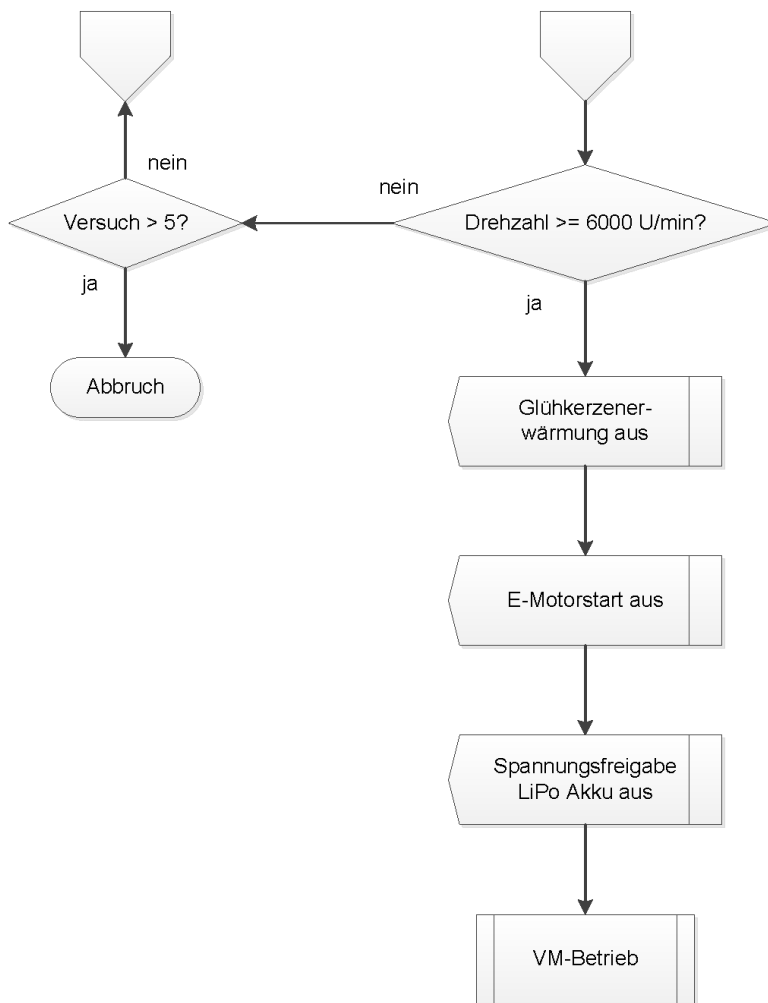


Abbildung 42: Ablaufdiagramm VM-Start Fortsetzung

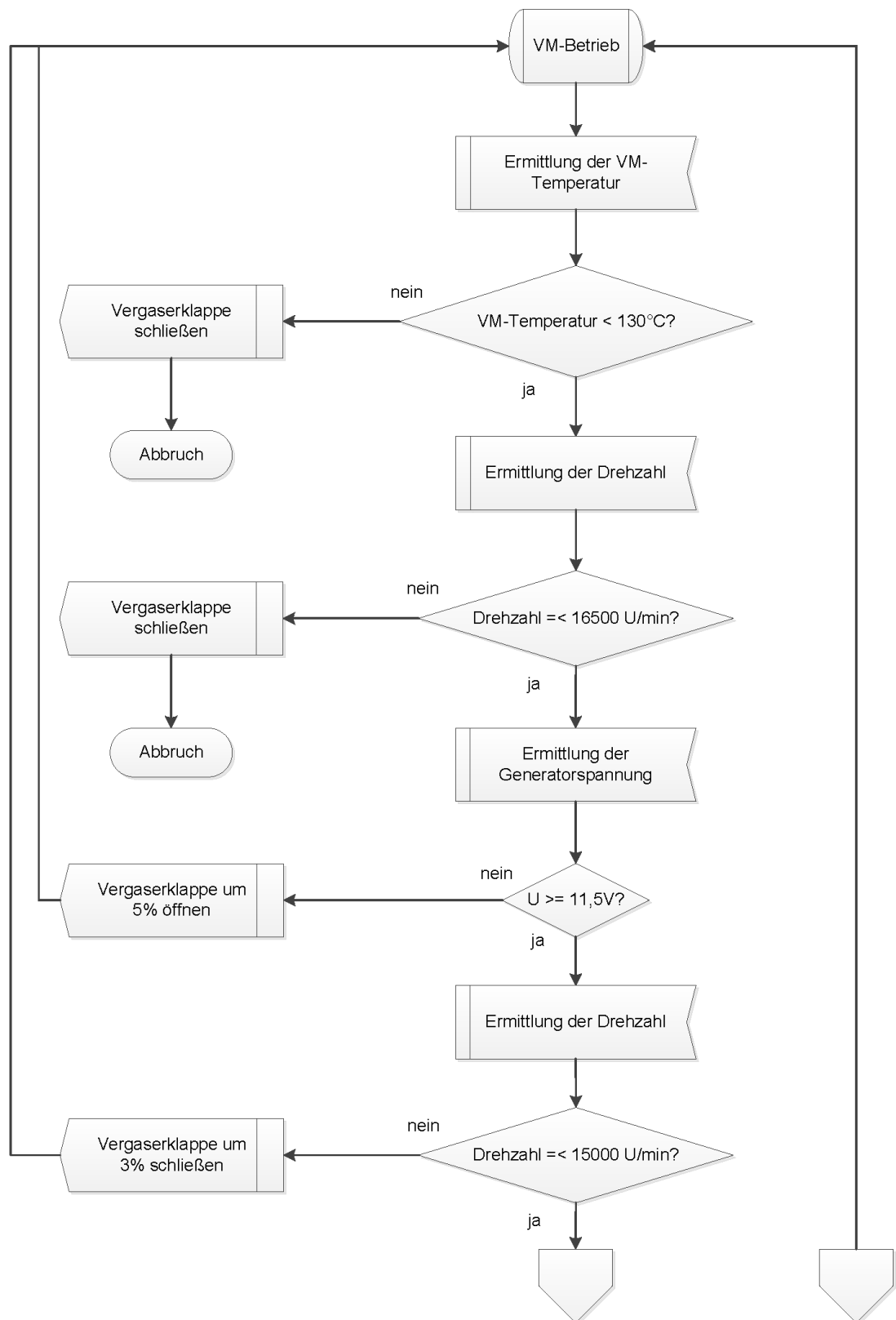


Abbildung 43: Ablaufdiagramm VM-Betrieb

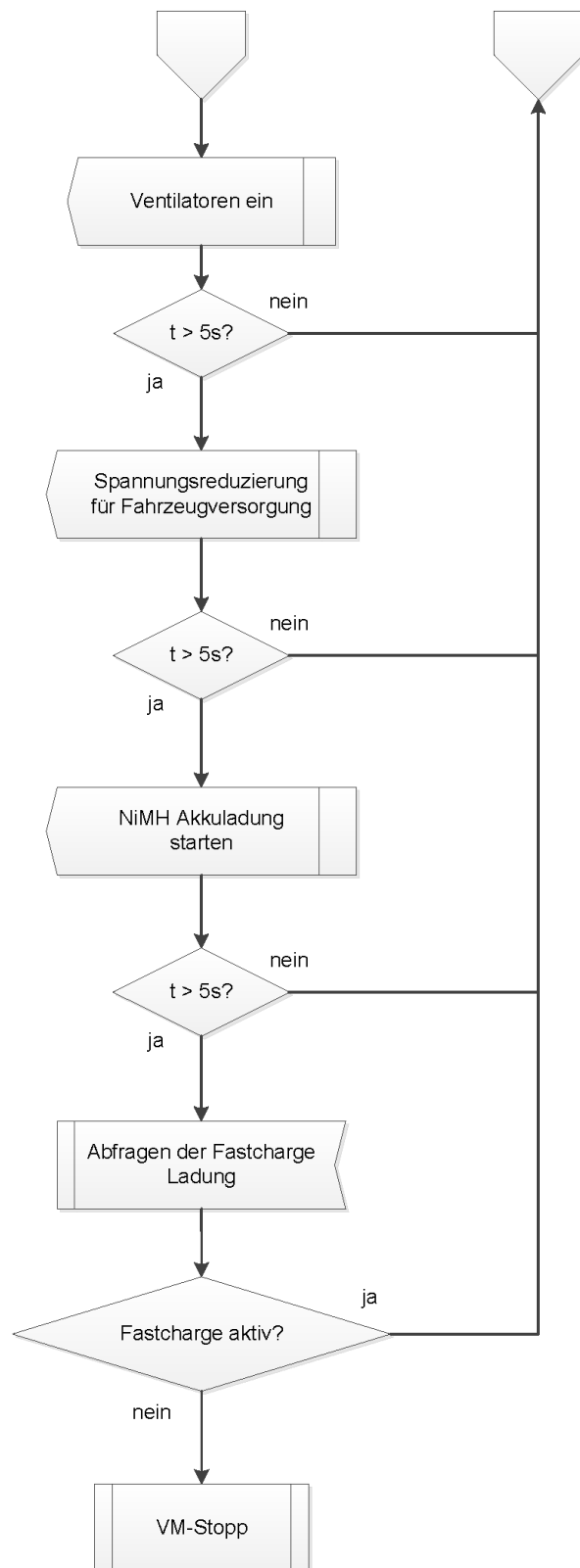


Abbildung 44: Ablaufdiagramm VM-Betrieb Fortsetzung

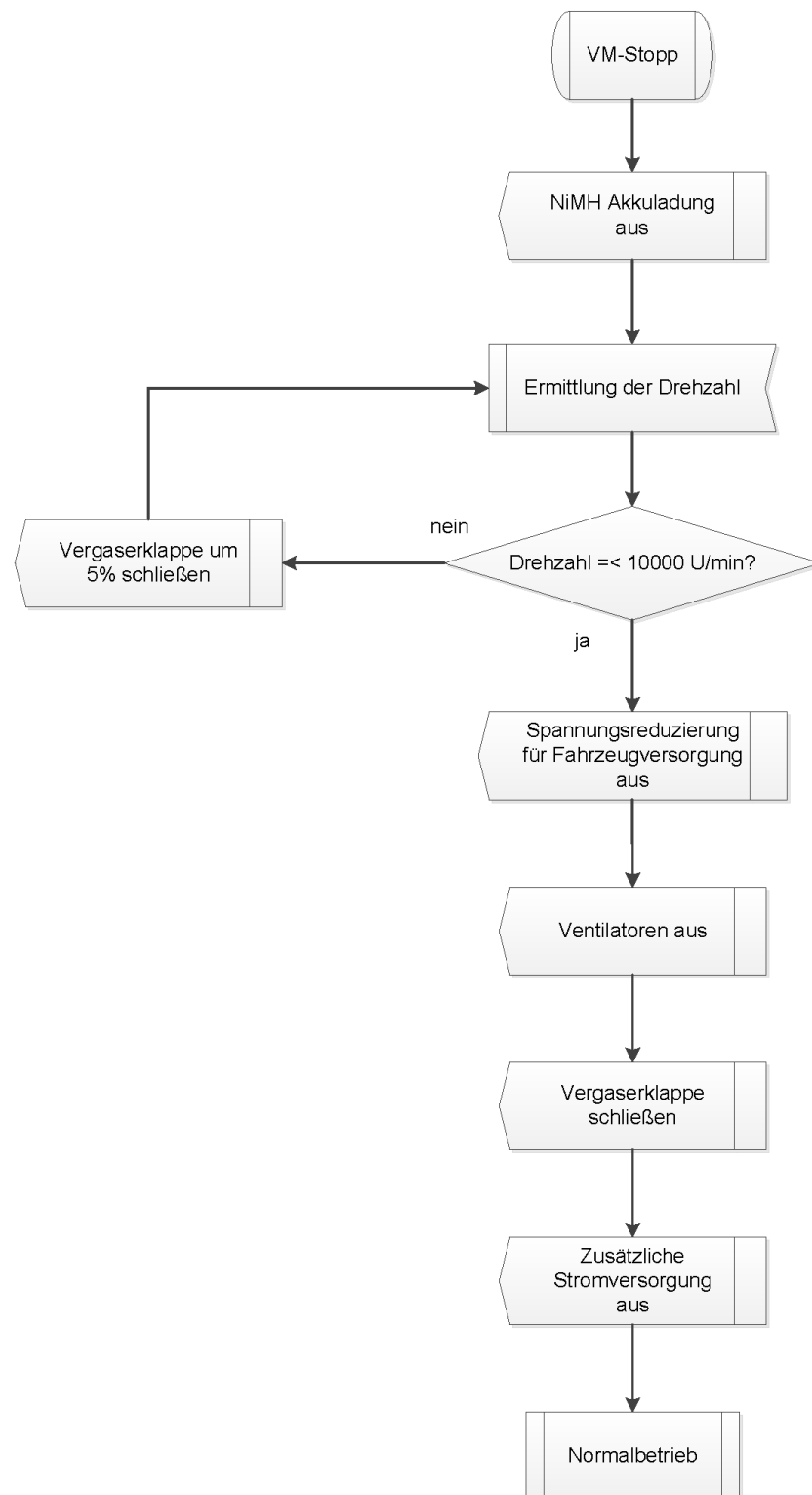


Abbildung 45: Ablaufdiagramm VM-Stopp

6 Funktionsnachweis

6.1 Auswertung der Elektromodellergebnisse

Die Rohdaten für die Auswertung lieferte das Fernsteuerungsprogramm RP6 Remotrol 1.3. Anschließend mussten die angesammelten Daten ausgewertet werden. Vor Fahrtantritt wurde der Roboter in den Prüfstand gestellt und mit dem Computer verbunden. Nach dem Start des Programms und der darauf folgenden Verbindung zum RP6 ist der Regler für die Motorensteuerung auf den Wert 13 der Skala gestellt worden (siehe Abbildung 46). Diese Starteinstellungen waren notwendig um die Elektromotoren nicht zu überhitzen.

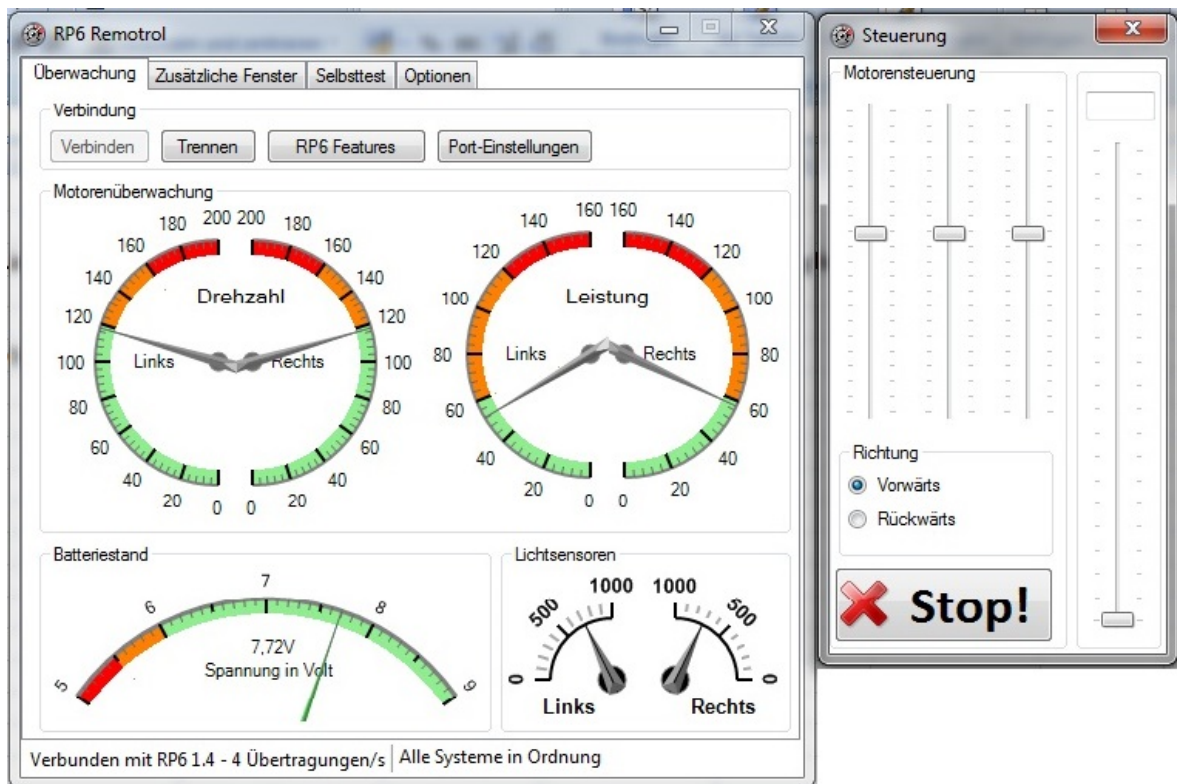


Abbildung 46: RP6 Remotrol 1.3 Starteinstellungen

Die vom Master Mikrocontroller übertragenen Werte wurden über das integrierte Terminal der Applikation RP6 Remotrol 1.3 abgelesen (siehe Abbildung 47).

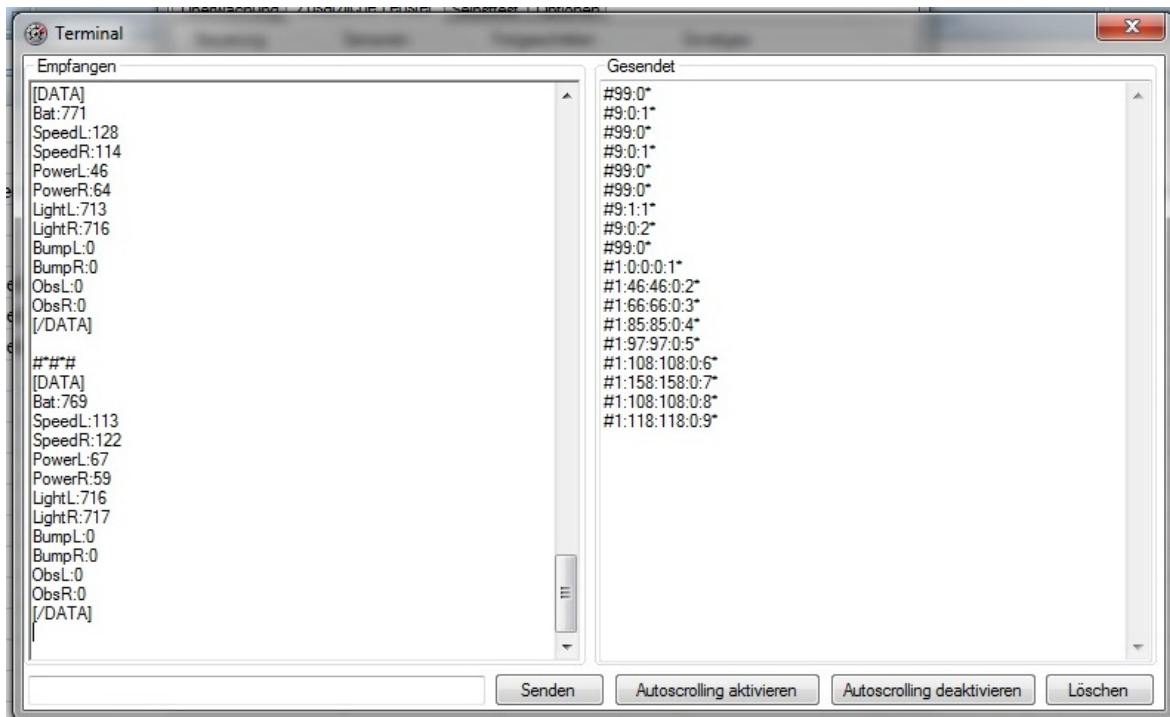


Abbildung 47: RP6 Remotrol 1.3 Terminal

Die für die Auswertung relevanten Größen waren Batteriestand (siehe Abbildung 48), Drehzahl (siehe Abbildung 49) und Motorstrom (siehe Abbildung 50). Vor dem Laufzeitest wurde in Minute 0 die unbelastete Akkuspannung von 8,38 V ermittelt. Nachdem die Regler gesetzt waren, sank die belastete Spannung von 8,38 V auf 8,25 V. Der durchschnittliche Stromverbrauch betrug 319 mA. Bei kontinuierlicher Spannungsreduzierung und nach einer Laufzeit von 7 Stunden 50 Minuten sank die belastete Spannung auf ein Minimum von 5,06 V ab. Abschließend wurde die unbelastete Akkuspannung von 5,7 V gemessen.

Die durchschnittlichen Drehzahlen betrugen links 115,25 U/min und rechts 114,88 U/min. Hingegen gab es bei den Motorströmen voneinander abweichende Ergebnisse. Auf der rechten Seite des RP6 Modells wurde ein durchschnittlicher Motorstrom von 90,69 arb.u. ermittelt. Der Durchschnittsmotorstrom auf der linken Seite betrug 67,50 arb.u. Die Begründung dafür ist, dass der Prüfstand einen geringen, schiefen Hang nach rechts hatte. Somit wurde das Gewicht des Vehikels ungleich verteilt. Da der Sollwert beider Seiten auf die gleiche Position eingestellt war, musste die rechte Raupe mehr Kraft einsetzen, um das gleiche Drehzahlniveau zu halten.

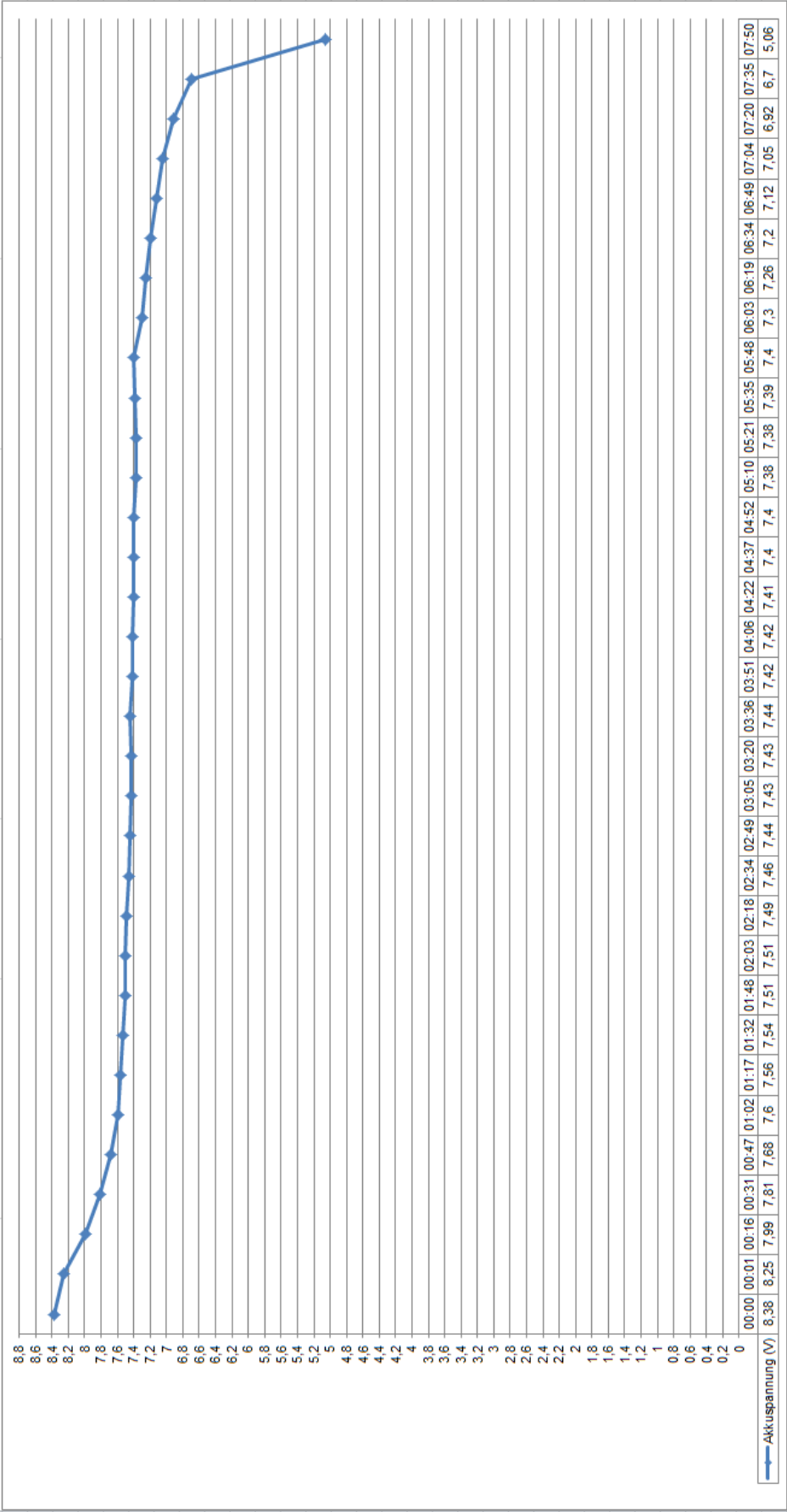


Abbildung 48: Akkuspannung Elektromodell

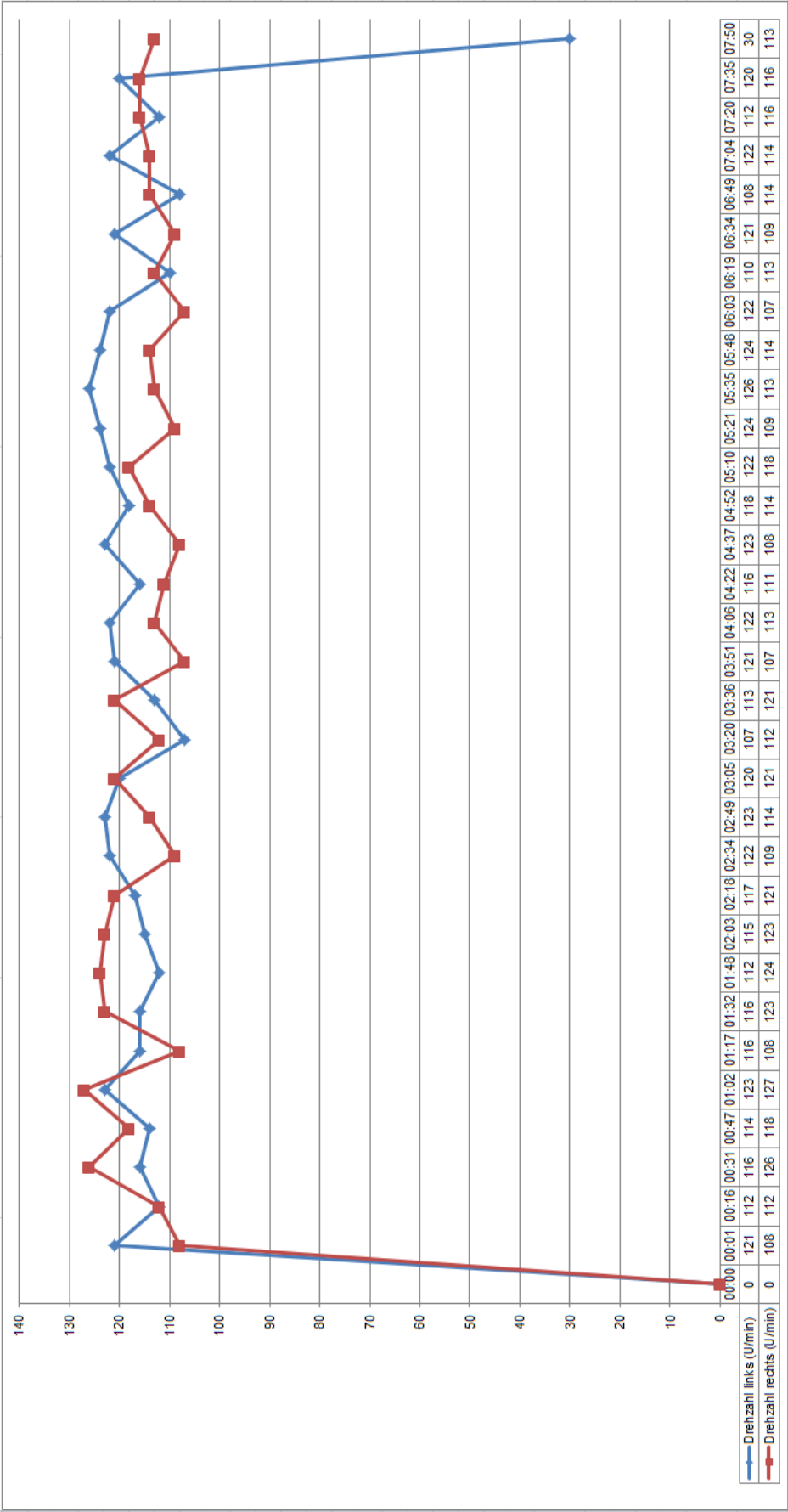


Abbildung 49: Drehzahlen Elektromodell

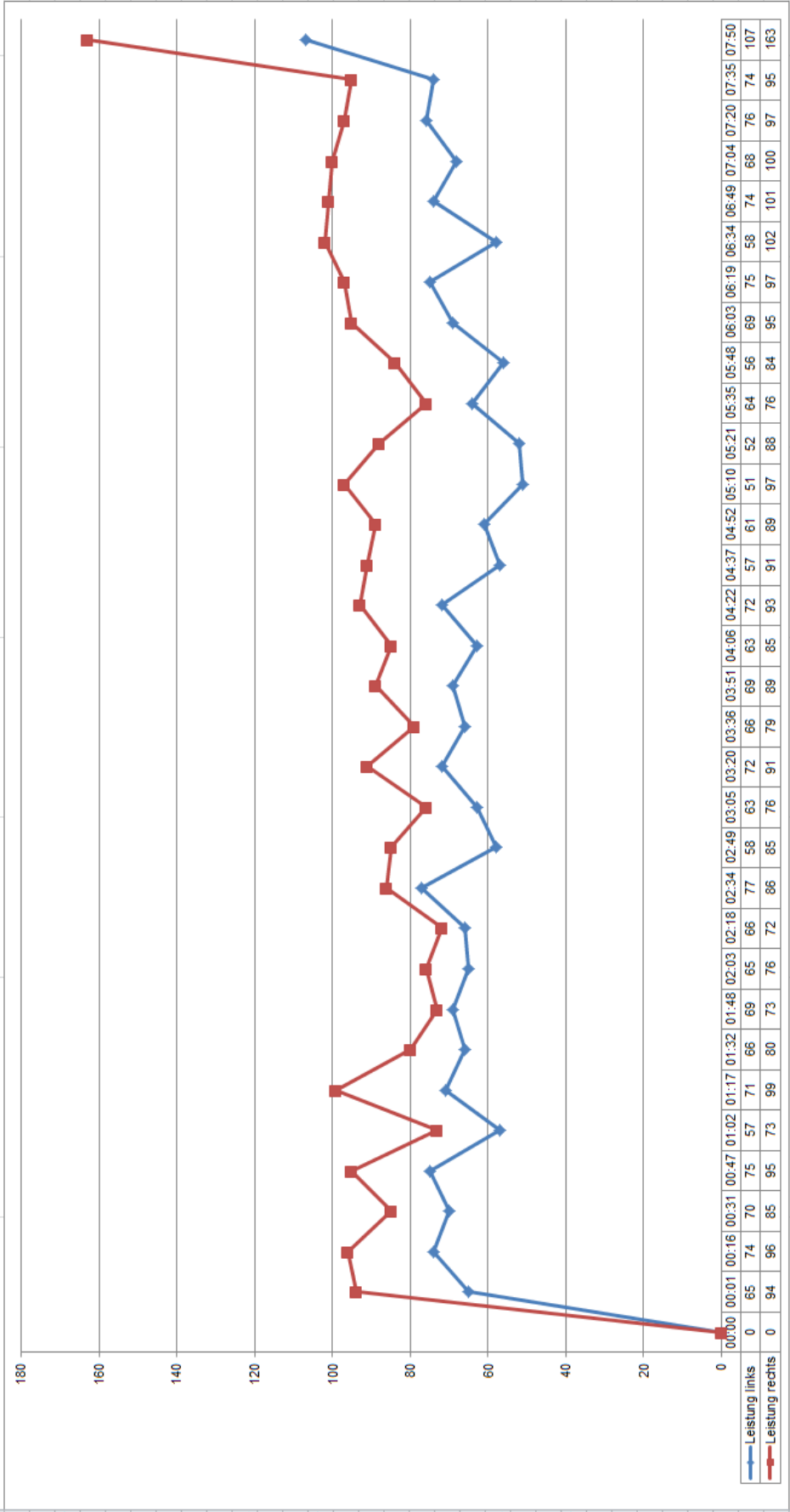


Abbildung 50: Motorströme Elektromodell

6.2 Auswertung der Hybridmodellergebnisse

In der Hybridmodellversuchsreihe wurde ebenfalls das Fernsteuerungsprogramm RP6 Remotrol 1.3 mit den selbigen Starteinstellungen, die beim Elektromodell gesetzt wurden, verwendet.

Relevante Größen für die Auswertung waren Generatorspannung, Fahrzeugspannung (siehe Abbildung 51), Drehzahl (siehe Abbildung 52), Motorstrom (siehe Abbildung 53) und Motortemperatur (siehe Abbildung 54). Vor dem Laufzeittest sind in Minute 0 die unbelastete Fahrzeugspannung von 7,1 V und die Generatorspannung von 9,4 V ermittelt worden. Nachdem die Regler gesetzt waren, sank die belastete Fahrzeugspannung von 7,1 V auf 6,75 V. Der durchschnittliche Stromverbrauch betrug 363 mA. Bei kontinuierlich durchschnittlicher Fahrzeugspannung von 6,74 V, einer durchschnittlichen Generatorspannung von 9,4 V und einer Laufzeit von 19 Minuten war die Treibstofffüllung geleert und die Stromversorgung unterbrochen.

Die durchschnittlichen Drehzahlen betrugen links 120,20 U/min und rechts 118,40 U/min. Hingegen gab es bei den Motorströmen voneinander abweichende Ergebnisse. Auf der rechten Seite des RP6 Modells wurde ein durchschnittlicher Motorstrom von 89,80 arb.u. ermittelt. Der Durchschnittsmotorstrom auf der linken Seite betrug 69,80 arb.u.

Anfänglich führte man die Versuche ohne Kühlung durch, wodurch der Verbrennungsmotor durchschnittlich Temperaturen von 91,5 °C erreichte. Danach kam die Überlegung auf, die Motortemperatur durch einen Standventilator auf ein Minimum zu reduzieren. Die anfängliche Motortemperatur betrug 54,3 °C. Trotz der Kühlung betrug die Durchschnittstemperatur 83 °C.

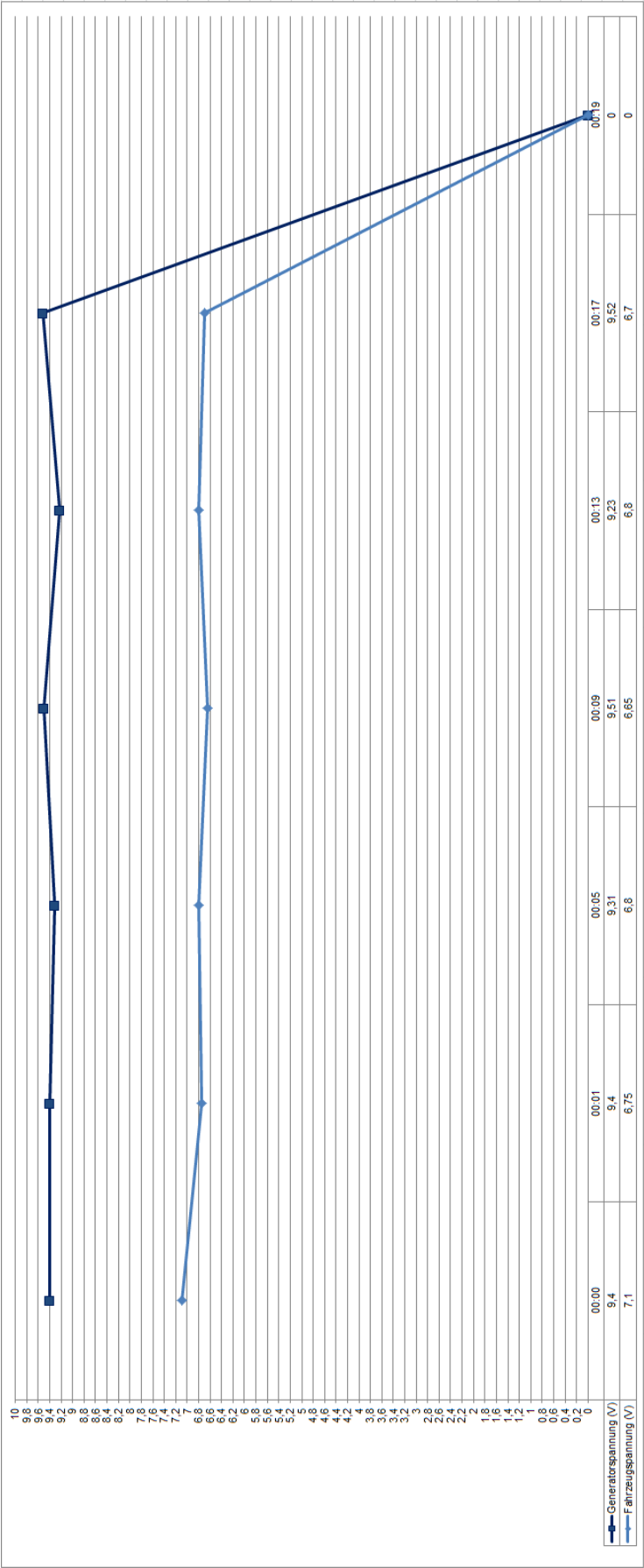


Abbildung 51: Spannungen Hybridmodell

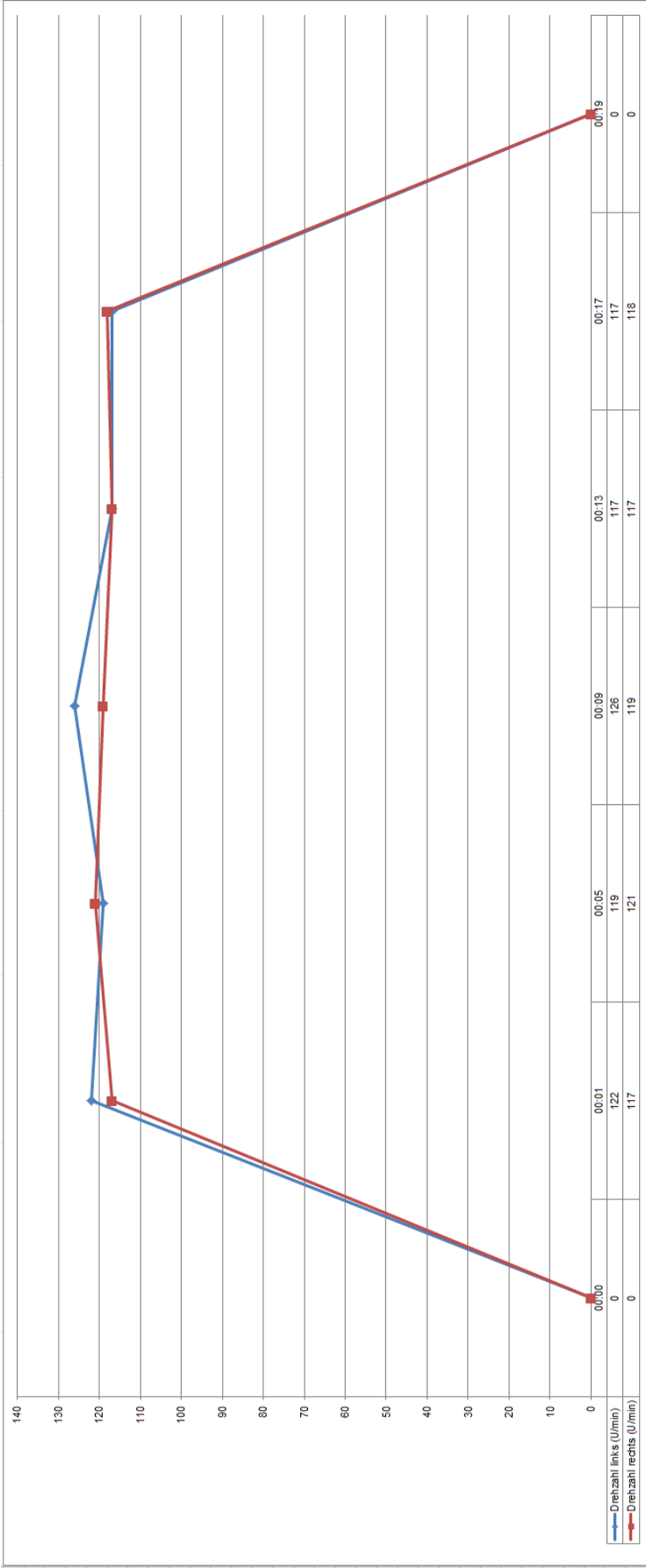


Abbildung 52: Drehzahlen Hybridmodell

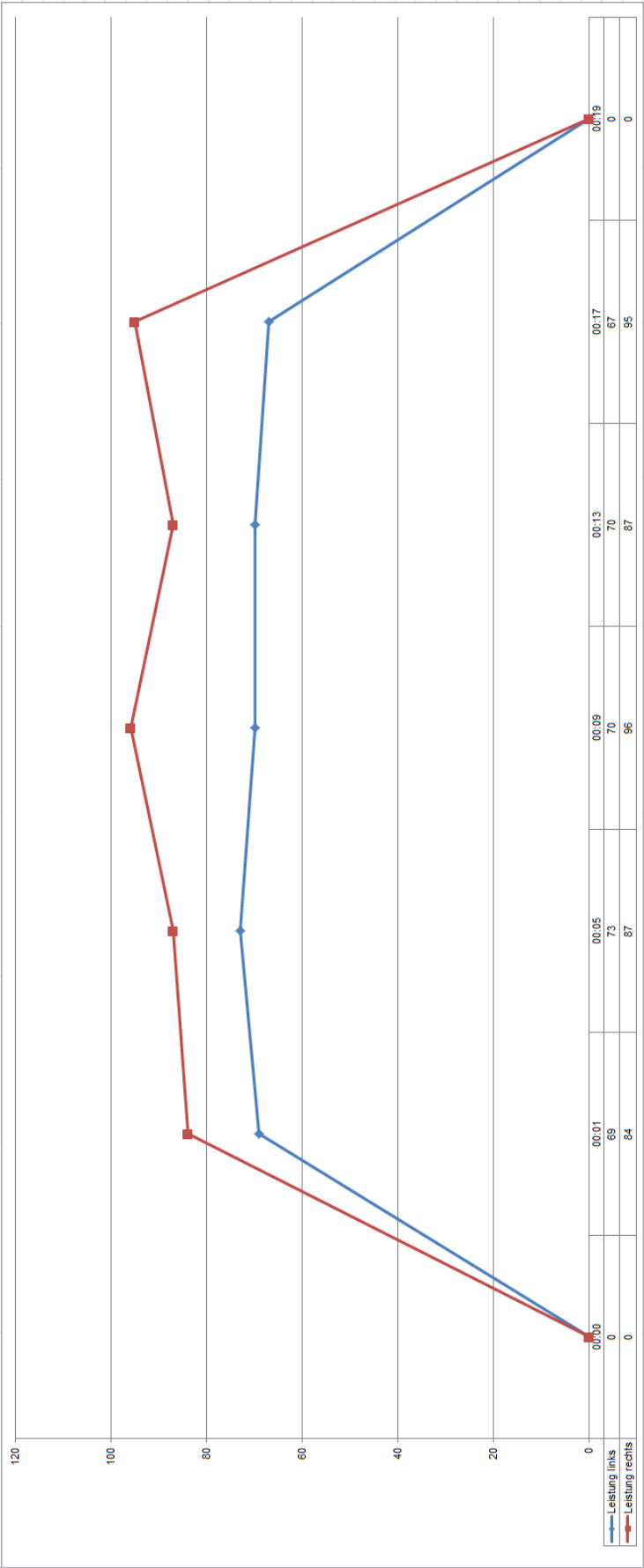


Abbildung 53: Motorströme Hybridmodell

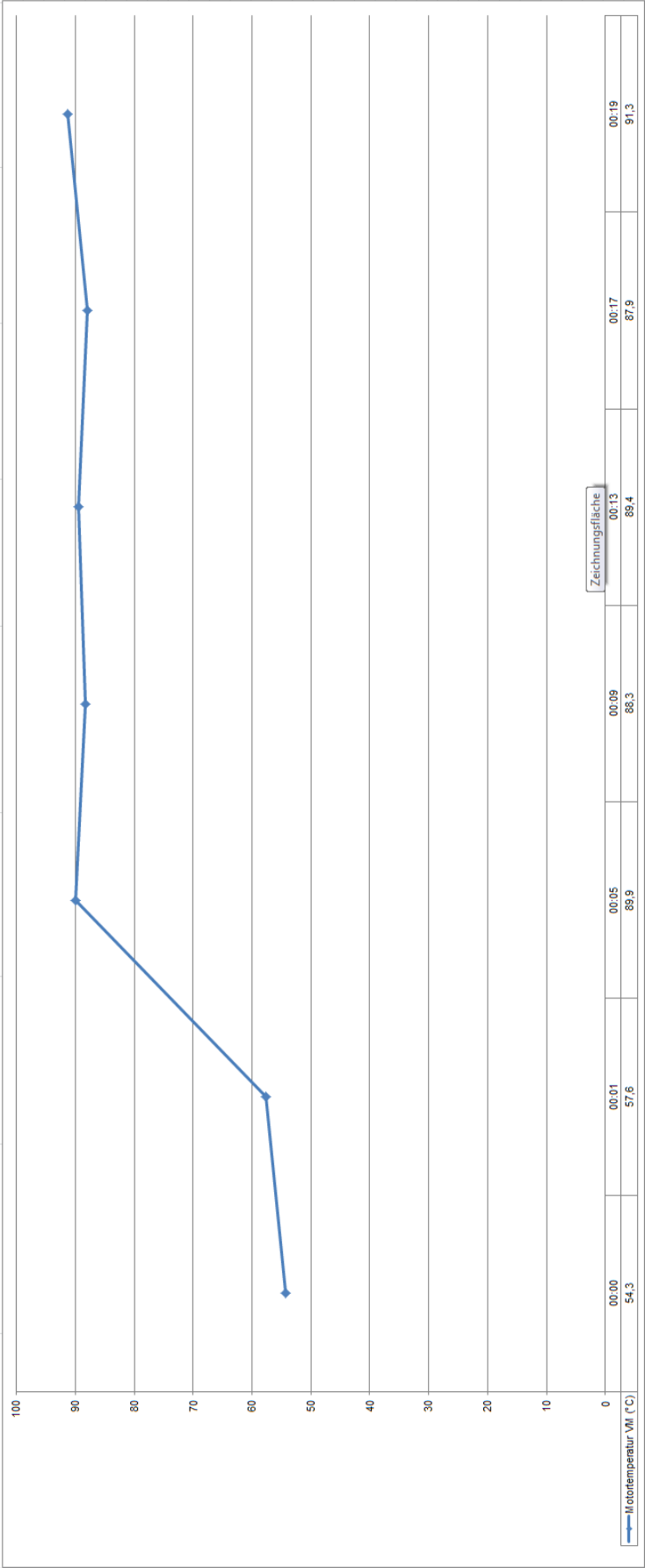


Abbildung 54: Temperatur Hybridmodell

6.3 Auswertung der Ergebnisse der modifizierten Version des Hybridmodells

Nachdem alle entwickelten Komponenten ordnungsgemäß auf Funktion getestet wurden, kam die Frage auf, wie lange die Ladedauer des Vehikels im Vergleich zu einer Normalladung mit dem Laderegler benötigt. Weiteres stellte sich die Frage, wie lange man im Vergleich zu einem regulären Elektromodellfahrttest, mit den über den Laderegler aufgeladenen NiMH Akku das Fahrzeug betreiben kann.

In der Ladedauer-Auswertung waren die Größen Ladespannung und Ladestrom relevant. Die Abbildung 55 zeigt einen normalen Ladevorgang über das vom Hersteller empfohlene Ladegerät. Vor dem Ladevorgang wurde in Minute 0 die erschöpfte NiMH Akkuspannung von 6,51 V ermittelt. Während der Dauer des Ladevorgangs blieb der Ladestrom konstant und die Ladespannung stieg stetig an. Nach dem Ladevorgang von 2 Stunden 42 Minuten wurde abschließend eine Akkuspannung von 8,47 V gemessen.

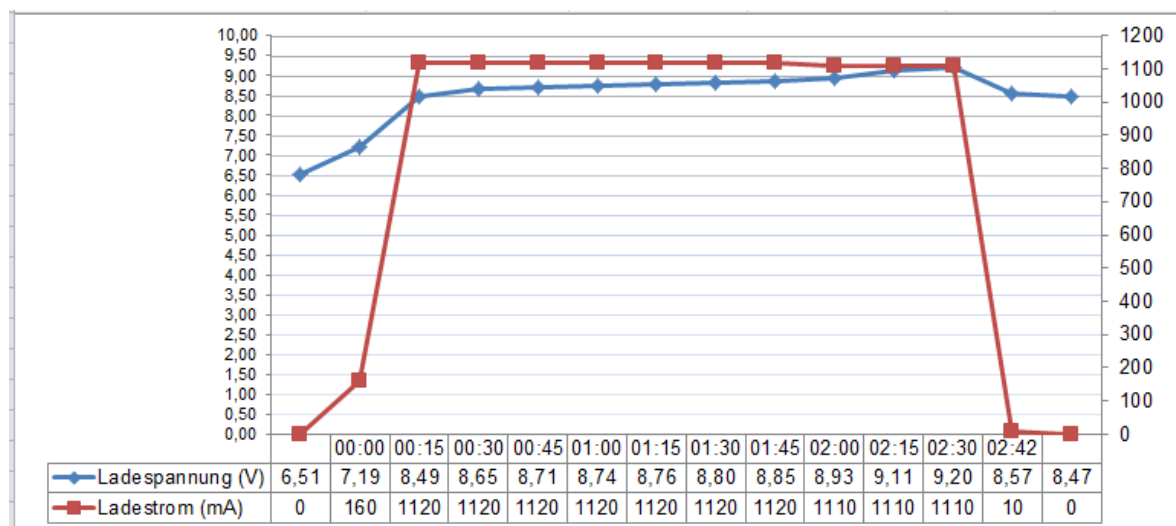


Abbildung 55: Ladetest mit dem Ladegerät

Die Ladereglerschaltung ist für eine 4 Ampere Ladung ausgelegt worden, um eine extrem kurze Ladedauer zu erzielen, da eine Treibstofffüllung im Hybridbetrieb für maximal 19 Minuten ausreicht. Wegen vorhandener Betriebsmittel musste der Ladetest mit einem strombegrenzten Netzgerät, bei dem ein Maximalstrom von 3,1 A möglich ist, durchgeführt werden.

Der Ladevorgang des modifizierten NiMH Ladereglers ist in Abbildung 56 dargestellt. Vor Ladebeginn wurde in Minute 0 die erschöpfte NiMH Akkuspannung von 7 V ermittelt. Während der Dauer des Ladevorgangs blieb auch beim Laderegler der Ladestrom konstant, wobei der Ladestrom fast dreimal so hoch war. Die Ladespannung des Ladereglers war im Gegensatz zum regulären Ladevorgang von Beginn an etwas höher und stieg

ebenfalls stetig an. Nach einer Ladedauer von 17 Minuten wurde abschließend eine Akkuspannung von 8,35 V gemessen. Die kurze Ladedauer ergibt sich aufgrund der vom Netzgerät eingestellten Strombegrenzung. Beim Versuch den Akku über die Strombegrenzung von 3,1 A zu laden, versuchte der Laderegler den fehlenden Strom über die Spannung auszugleichen. Gegen Ende der Ladezeit fiel am Transistor zu wenig Spannung ab um korrekt durchzuschalten. Diese Aktion führte den Ladeabbruch herbei.

Eine erneute Überprüfung des Ladetests über den Laderegler wurde mit einem zusätzlichen 33 mΩ Widerstand, der in Serie zu den beiden anderen 33 mΩ Widerstände geschaltet wurde, durchgeführt. Durch den Verbau des zusätzlichen Widerstandes verringerte sich der Ladestrom auf 2,2 A. Der Laderegler brach nach einer Schnellladezeit von 45 Minuten den Ladevorgang ab. Nachdem die am Laderegler parametrisierte Zeit von 45 Minuten voll ausgenutzt wurde, ist auch bei diesem Ladevorgang eine Vollladung des Akkus ausgeschlossen.

Eine annähernde Vollladung des Akkus könnte dennoch mit der Erhöhung der Ladespannung auf 15,5 V und einem Ladestrom von 3,1 A realisiert werden. Diese Leistung kann das vorhandene Netzgerät nicht liefern. Deshalb entschloss sich der Autor die Ladereglerschaltung im VM-Betrieb nochmals zu testen.

Nachdem die Laufzeit des Nitromotors sehr kurz war, zog man für die Bestimmung der theoretisch niedrigsten Akkukapazität, die Auswertung des 17 Minuten Ladetests heran.

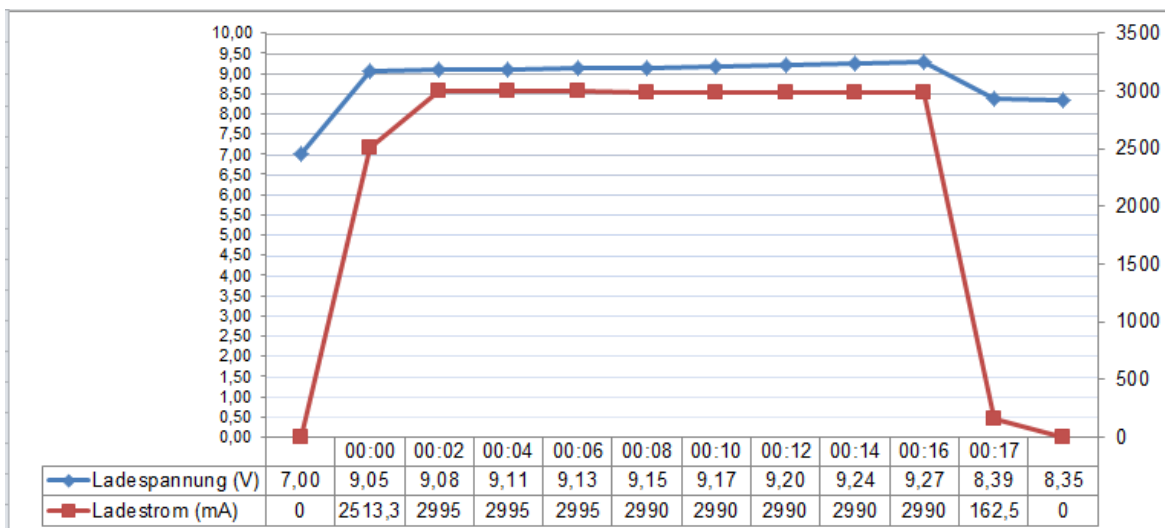


Abbildung 56: Ladetest mit dem NiMH Laderegler

Wegen des erhöhten Ladestroms war während des Ladevorgangs die Temperaturüberwachung von Akku, Transistor und MAX712 erforderlich. Dabei wurden nachfolgende Temperaturbereiche gemessen:

Peripherie	Minimaltemperatur	Maximaltemperatur
Akku	26,9°C	37,4°C
Transistor	27,5°C	35,6°C
MAX712	28,1°C	35,5°C

Tabelle 5: Temperaturbereiche für Akku, Transistor und MAX712

Für die Fahrdauer-Auswertung waren die Größen Batteriestand, Drehzahl und Motorstrom relevant. In den Abbildungen (Abbildung 48, Abbildung 49, Abbildung 50) sind die Größen für den Elektromodelltest dargestellt. Hingegen sind in den Abbildungen (Abbildung 57, Abbildung 58, Abbildung 59) die Größen für die durchgeführten Elektromodelltests, wobei die Aufladung mit dem Laderegler erfolgte, angezeigt.

In der Versuchsreihe verwendete man ebenfalls das Fernsteuerungsprogramm RP6 Remotrol 1.3 mit den selbigen Starteinstellungen, die beim Elektromodell gesetzt wurden.

Vor dem Beginn des Laufzeittests wurde in Minute 0 die unbelastete Akkuspannung von 8,19 V ermittelt. Nachdem die Regler gesetzt waren, sank die belastete Spannung von 8,19 V auf 8,06 V. Bei schnell abfallender Spannung und nach einer Laufzeit von 2 Stunden 45 Minuten sank die belastete Spannung auf ein Minimum von 5,05 V ab. Abschließend wurde die unbelastete Akkuspannung von 5,5 V gemessen.

Die durchschnittlichen Drehzahlen betrugen links 108,83 U/min und rechts 109,83 U/min. Hingegen gab es bei den Motorströmen voneinander abweichende Ergebnisse. Auf der rechten Seite des RP6 Modells wurde ein durchschnittlicher Motorstrom von 73,58 arb.u. ermittelt. Der Durchschnittsmotorstrom auf der linken Seite betrug 52,83 arb.u.

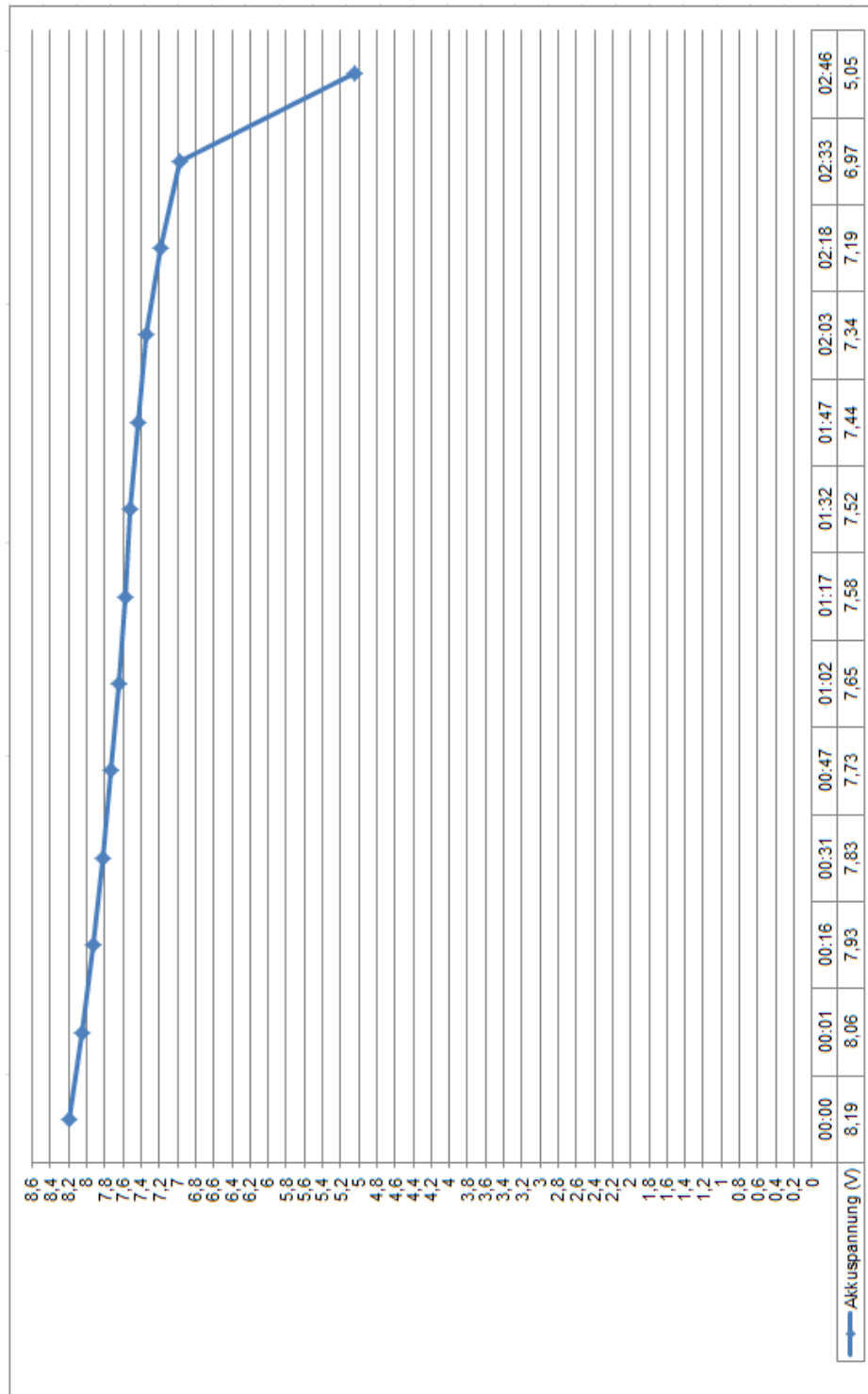


Abbildung 57: Akkuspannung Elektromodell – Aufladung über Laderegler

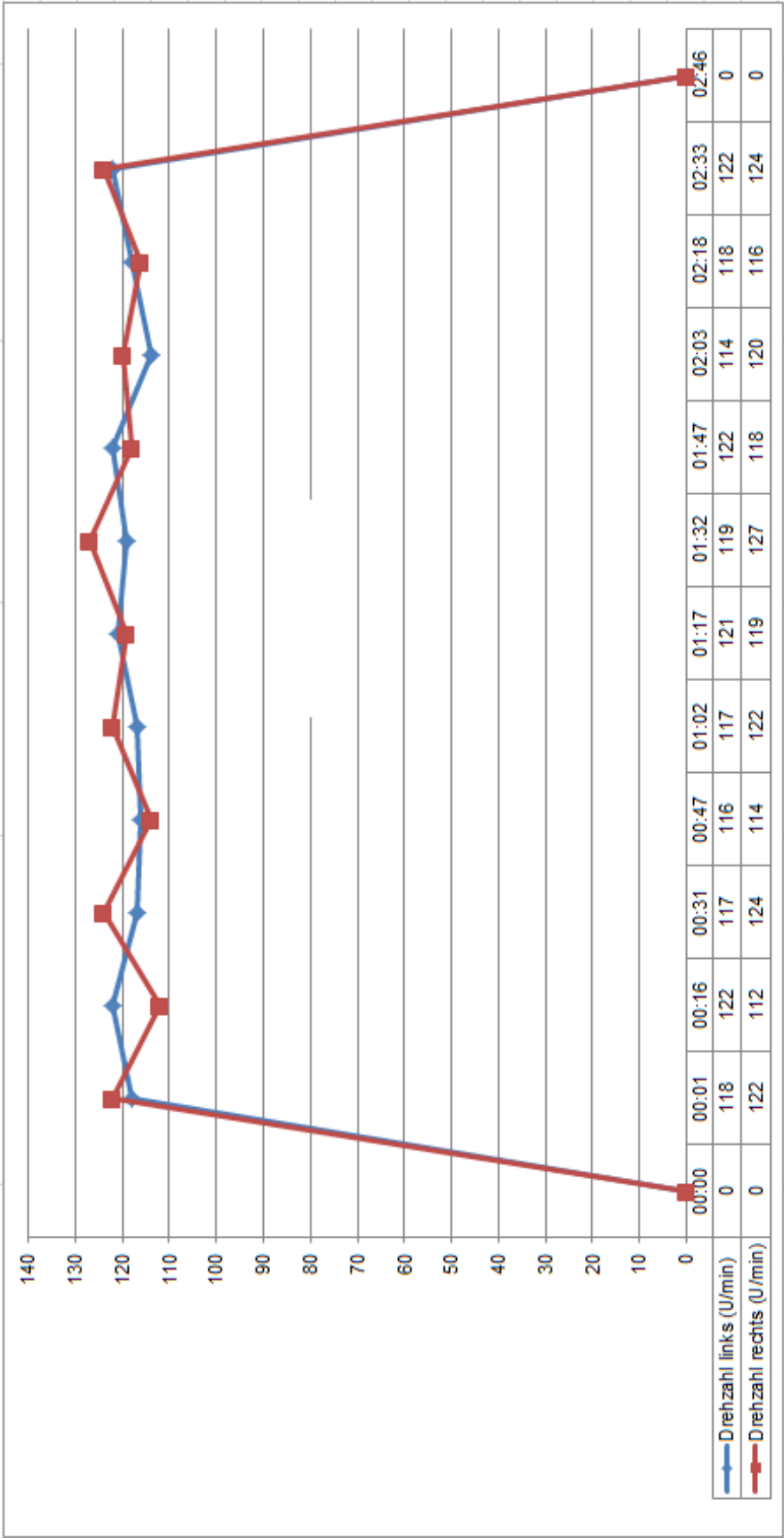


Abbildung 58: Drehzahlen Elektromodell - Aufladung über Laderegler

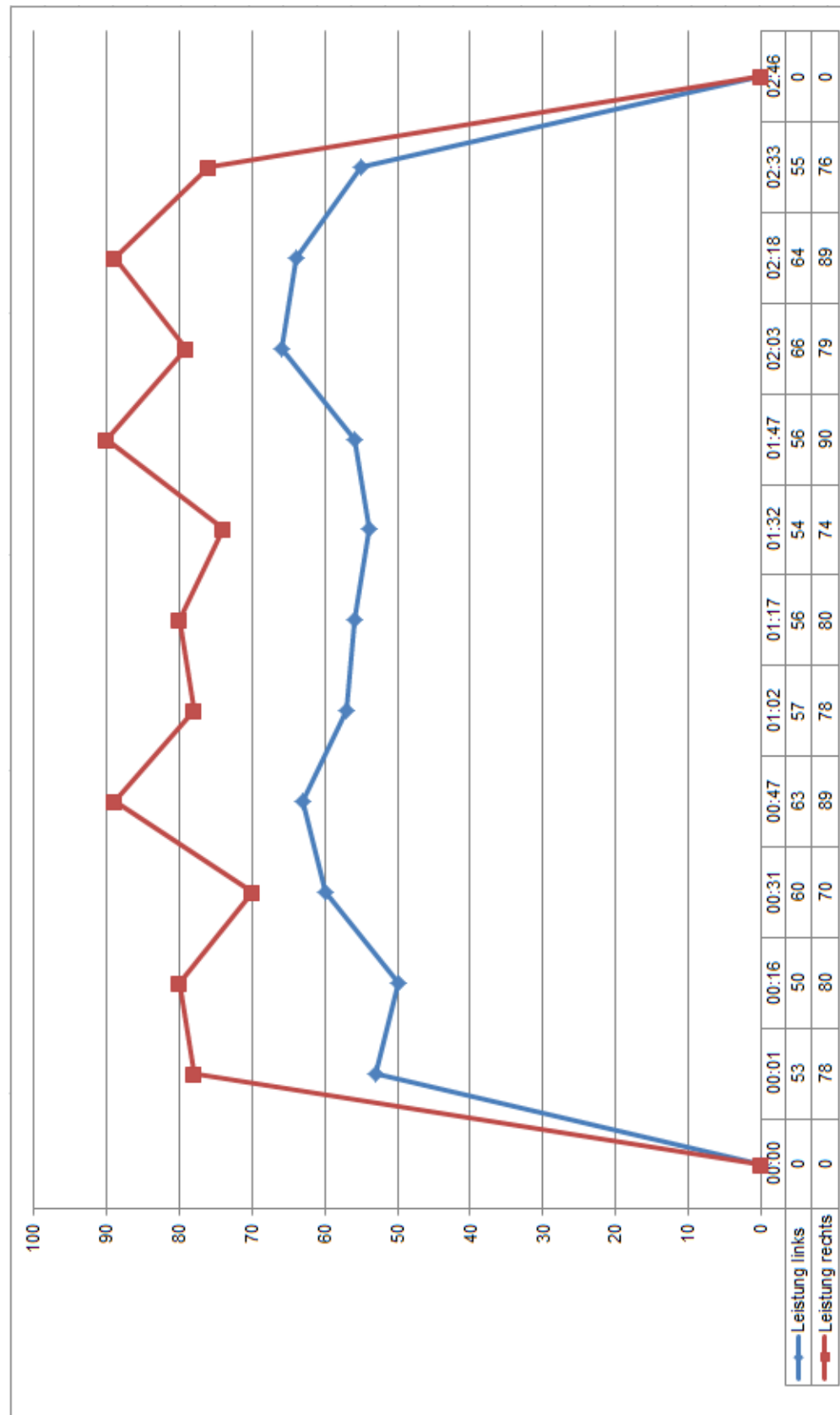


Abbildung 59: Motorströme Elektromodell - Aufladung über Laderegler

6.4 Problematik der modifizierten Version des Hybridmodells

Nachdem die Fahrdauer-Auswertung am Elektromodell durchgeführt wurde und alle Komponenten für die Hybridmodifizierung montiert waren, folgte im nächsten Schritt die Ansteuerung der Transistoren über die C-Control Pro IDE Entwicklungsumgebung. Eine Überprüfung auf Funktion war bei den einzulesenden Werten Akkustand des NiMH Akkus, Drehzahlmessung, VM-Temperaturmessung und VM-Spannungsmessung unerlässlich. Der für das Hauptprogramm relevante Quellcode ist in den Anlagen, Modifizierte Version des Hybridmodells vorzufinden.

Beim Testen der Transistoren stellte man fest, dass bei einer aufrechten PC Verbindung mit der Applikation RP6 Remotrol 1.3 der Task PCConnection beim Einsetzen des Timers AbsDelay keine erfolgreiche Übertragung an den Mikrocontroller senden kann. Somit wurde für das Testen in Verbindung mit der Applikation RP6 Remotrol 1.3 eine Hilfsvariable deklariert, die mehrere Zyklen des Hauptprogramms durcharbeitete und danach die Abarbeitung der einzelnen Ansteuerungen vornahm.

Aus dem Quellcode ist ersichtlich, dass die Verwendung von Timern dennoch erforderlich war. Deren Einsatz war für die schrittweise Nachvollziehbarkeit und für Testzwecke notwendig. Für die Prüfung des Zwischenzustandes VM-Start wurde zuerst das Programm in den Mikrocontroller übertragen und anschließend ohne PC Verbindung getestet. Der Versuch den Verbrennungsmotor mittels Ansteuerung der Transistoren zu starten, führte zu einem negativen Resultat, da die Treibstoffleitung zu viele Lufteinschlüsse hatte und somit verhinderte, dass der Vergaser mit ausreichend Treibstoff versorgt werden konnte.

Im nächsten Schritt wurde der Verbrennungsmotor manuell gestartet. Durch das Auskommentieren des Startprozesses im Quellcode, gewährleistete die Applikation RP6 Remotrol 1.3 die Verbindung zum PC. Anschließend stellte die C-Control Pro IDE Entwicklungsumgebung die Werte Akkustand des NiMH Akkus, VM-Temperaturmessung und VM-Spannungsmessung im Ausgabefenster dar.

Die im Programmcode ermittelten ADC Werte der VM-Temperaturmessung sind aus der Tabelle 6 zu entnehmen. Grundsätzlich sind die Widerstandswerte für die Temperaturbereiche im Datenblatt des PTC KTY81-110 einsehbar. Zur Nachvollziehbarkeit ist folgende Formel anzuwenden:

$$R_{kty} = R_{25} * (1 + (\Delta T * \alpha) + (\Delta T^2 * \beta))$$

R_{25} – Widerstand bei 25°C → z.B.: 1000 Ω

ΔT – Differenz zwischen tatsächlicher Temperatur und 25°C → bei 40°C = $\Delta T + 15K$

α – Konstante 0,00788 K⁻¹

β – Konstante 0,00001937 K⁻²

Für die annähernde Linearisierung wurde das Resultat des jeweiligen ADC Wertes wie folgt berechnet:

$$T = \frac{ADC}{f} - y$$

ADC – gemessener ADC Wert

f – ermittelter Faktor von 1,578 bei mehrmaligen Einlesen und verschiedenen Temperaturbereichen

y – Offset von 150

Temperatur aus Datenblatt	Widerstand des PTC	Strom durch PTC	Spannung am ADC	Resultat des ADC	Ist-Temperatur (T)
-55°C	490 Ω	1,567 mA	0,7680 V	157	-50°C
-40°C	567 Ω	1,530 mA	0,8678 V	177	-37°C
-20°C	684 Ω	1,477 mA	1,0106 V	206	-18°C
0°C	815 Ω	1,422 mA	1,1593 V	237	0°C
+20°C	961 Ω	1,366 mA	1,3125 V	268	+20°C
+40°C	1122 Ω	1,308 mA	1,4678 V	300	+40°C
+100°C	1696 Ω	1,137 mA	1,9290 V	395	+100°C
+120°C	1915 Ω	1,083 mA	2,0748 V	425	+119°C
+140°C	2124 Ω	1,036 mA	2,2015 V	450	+135°C
+150°C	2211 Ω	1,018 mA	2,2511 V	461	+142°C

Tabelle 6: Wertetabelle für PTC KTY81-110

Quelle: Sprut (2012)

Zur Sicherheit war die Überprüfung von Temperatur und Drehzahl mit den Messgeräten Voltcraft Infrarot-Thermometer IR 260-8S und Voltcraft Laser-Drehzahlmesser DT-10L ebenfalls nötig. Die Spannungen maß das Messgerät Mastech M-830B.

Beim Versuch den Generator auf einer Ausgangsspannung von 12 VDC über den Verbrennungsmotor zu betreiben, stellte sich heraus, dass der Verbrennungsmotor den Generator auf einer zu hohen Drehzahl betreiben muss. Dabei erreichte der VM trotz eines aufgestellten Standventilators, Temperaturen von über 150°C, wobei die Betriebstempera-

tur bei 120°C liegen sollte. Außerdem ist zu vermerken, dass keine Last am Generator angeschlossen war. An der Unterdimensionierung des Verbrennungsmotors lag das Problem allerdings nicht. Nachdem der Motor laut Datenblatt eine Nennleistung von 1100 W bei einer Drehzahl von 21000 U/min erreichen sollte und die geforderte Verbraucherleistung 60 W beträgt, ist anzunehmen, dass der Motor nicht überlastet wird.

Das größte Problem ist die Kupplung zwischen Verbrennungsmotor und Generator. Zum Einsatz kamen mehrere Modelle der Zentrierkupplung (siehe Abbildung 36) und einige Modelle der Direktkupplung. Durch die hohe durchschnittliche Drehzahl von 16256 U/min und der erhöhten durchschnittlichen Motortemperatur von 156°C, rissen bei der Zentrierkupplung die O-Ringe. Anschließend lockerten sich die Schrauben, was wiederum zur Unwucht führte und die Kupplung unbrauchbar machte. Die Direktkupplung wurde anfangs mit versenkbaren Schrauben montiert, die sich bei einer durchschnittlichen Drehzahl von 14850 U/min und einer durchschnittlichen Motortemperatur von 151°C ebenfalls lockerten. Das hatte zur Folge, dass der Kraftschluss der Kupplung nicht mehr gegeben war. Darauf folgend wurde die Direktkupplung mit einem Schraubenkleber fixiert und ein erneuter Versuch durchgeführt. Nach einem weiteren Fehlschlag durch den Verlust der Kupplungshaftung und der Feststellung der Kupplungstemperatur von über 120°C, musste der Versuch abgebrochen werden.

Zur Problematik der Kupplung kam das Problem der Vibration hinzu. Trotz der verbauten Schwingungsdämpfer (siehe Abbildung 32) lockerten sich Schrauben und eingelötete Bauteile vom Konstrukt.

Die im Modellbau üblichen Grenzen sind letztlich überschritten worden und machen eine Realisierung unmöglich. Außerdem wurde das festgelegte Budget von 1000 € durch mehrfache Fehlschläge und die daraus resultierenden Konstruktionsänderungen überschritten.

7 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

Der Versuch, die Stapler mit den nachkonstruierten Modellbaufahrzeugen zu vergleichen, erwies sich als äußerst schwierig und führte nicht bei allen Modellen zu einem zufriedenstellenden Ergebnis.

In der nachfolgenden Tabelle sind die von den Herstellern angegebenen Werte eingetragen, die den Vergleichswerten (Modellvergleich und Messwerte) gegenübergestellt wurden.

	Herstellerangaben (Still, Arexx, Varta, Conrad)	Modellvergleich	Messwerte
Elektrostapler Akkukapazität (Ah)	700	2,5 Elektromodell	-
Elektrostapler Spannung (V)	80	7,2 Elektromodell	-
Arbeitsspiel Elektrostapler Energieverbrauch (W)	8600	-	siehe Berechnung
Fahrmotor Elektrostapler Energieverbrauch (W)	15000	-	-
Hubmotor Elektrostapler Energieverbrauch (W)	16300	-	-
Elektrostapler Gewicht (kg)	5539	-	0,742 Elektromodell

Elektromodell Akkukapazität (mAh)	2500	700000 Elektrostapler	-
Elektromodell Spannung für 6 Zellen (V)	7,2	80 Elektrostapler	8,3 Elektromodell
Hybridstapler Motorleistung (kW)	38	1,1 Hybridmodell	-
Hybridstapler Spannung (V)	12	-	9,4 Hybridmodell
Hybridstapler Tankvolumen (l)	23	0,125 Hybridmodell	-
Hybridstapler Kraftstoffverbrauch (l/h)	3,1	-	siehe Berechnung
Hybridstapler Nenndrehzahl (U/min)	2600	21000 Hybridmodell	-
Hybridstapler Hubraum (cm³)	1900	2,49 Hybridmodell	-
Hybridstapler Gewicht (kg)	4565	-	1,786 Hybridmodell
Hybridmodell Motorleistung (W)	1100	38000 Hybridstapler	-

Hybridmodell Tankvolumen (ml)	125	23000 Hybridstapler	-
Hybridmodell Nenndrehzahl (U/min)	21000	2600 Hybridstapler	-
Hybridmodell Drehzahlbereich (U/min)	5000 - 28000	-	-
Hybridmodell Hubraum (cm³)	2,49	1900 Hybridstapler	-
Mod. V. Hybrid E-Motor Spannung (V)	12	-	12,1 Mod. V. Hybrid

Tabelle 7: Herstellerangaben und Vergleichswerte der Fahrzeuge und deren Komponenten

Die Tabelle 8 enthält die für die Ergebnisberechnung benötigten, gemessenen Werte.

	Gemessene Werte
Elektromodell durchschnittlicher Stromverbrauch (mA)	<u>319</u>
Elektromodell maximaler Stromverbrauch (mA)	<u>470</u>
Elektromodell Gewicht (g)	<u>742</u>
Elektromodell Fahrdauer (h:min)	<u>7:50</u>
Elektromodell Fahrdauer nach der Ladung mit dem Laderegler (h:min)	<u>2:46</u>
Hybridmodell durchschnittlicher Stromverbrauch (mA)	<u>363</u>
Hybridmodell durchschnittliche Spannung (V)	<u>9,4</u>
Hybridmodell Gewicht (g)	<u>1786</u>
Hybridmodell Fahrdauer (h:min)	<u>0:19</u>
Mod. V. Hybrid Gewicht (g)	<u>3372</u>

Tabelle 8: Gemessene Werte für die Berechnung der Fahrzeugdaten

Zusätzlich wurden für die Berechnung der Fahrzeugdaten die in der Tabelle 9 gelisteten Werte benötigt und angenommen.

	Angenommene Werte
Mod. V. Hybrid durchschnittlicher Strombedarf im Normalbetrieb (mA)	510
Mod. V. Hybrid Strombedarf bei 5 A im VM-Betrieb (mA)	5000

Tabelle 9: Angenommene Werte für die Berechnung der Fahrzeugdaten

Die Tabellen (Tabelle 10, Tabelle 11) stellen den Vergleich zwischen Elektrostapler und Elektromodell dar. Für die Berechnung der folgenden Formeln sind aus der Tabelle 7 und Tabelle 8 die Daten übernommen worden.

$$\text{Elektrostapler Stromverbrauch} = \frac{\text{Elektrostapler Energieverbrauch}}{\text{Elektrostapler Spannung}}$$

$$\text{Elektrostapler Stunden Dezimal} = \frac{\text{Elektrostapler Akkukapazität}}{\text{Elektrostapler Stromverbrauch}}$$

$$\text{Elektrostapler Fahrdauer in min} = \text{Elektrostapler Stunden Dezimal} * 60$$

$$\begin{aligned} \text{Elektromodell Energieverbrauch} \\ = \text{Elektromodell Spannung} * \text{Elektromodell Stromverbrauch} \end{aligned}$$

$$\text{Elektromodell Stunden Dezimal} = \frac{\text{Elektromodell Akkukapazität}}{\text{Elektromodell Stromverbrauch}}$$

$$\text{Elektromodell Fahrdauer in min} = \text{Elektromodell Stunden Dezimal} * 60$$

	Stromverbrauch (A)	Fahrdauer (h:min)
Arbeitsspiel Elektrostapler	107,50	6:31
Fahrmotor Elektrostapler	187,50	3:44
Hubmotor Elektrostapler	203,75	3:26

Tabelle 10: Ergebnisse des Elektrostaplers RX60-35

	Energieverbrauch (mW)	Fahrdauer (h:min)
Auswertung Elektromodell	2298	Siehe Tabelle 8
Vollauslastung Elektro-modell	3384	5:19
Auslastung bei 1 A	7200	2:30
Auslastung bei 1,5 A	10800	1:40

Tabelle 11: Ergebnisse des Elektromodells RP6

Nach Angabe der Firma Still wurden für die Berechnung der Arbeitslast des Staplers 60 VDI-Arbeitsspiele in der Stunde angenommen. Für den Vergleich mit dem Elektromodell waren die Durchführung der Versuche und das anschließende Heranziehen der Auswertungen essentiell. Die durchgeführten Tests fanden am Prüfstand statt, wodurch sich ein eingeschränkter Vergleichsrahmen ergab. Beispielsweise stand beim RP6 die Möglichkeit einer Hebetätigkeit nicht zur Verfügung.

Die in Tabelle 11 angeführte Vollauslastung stammt aus dem Kapitel 5 und soll verdeutlichen, dass sich die Fahrdauer bei Aktivierung aller vorhandenen Komponenten wesentlich verringert. Weiteres ist für die erweiterte Hybridmodifikation die Elektromodell Auslastung bei 1,5 A untersucht worden. Dieser Wert war wichtig, da die Elektronik für die Fahrzeugversorgung auf die Strombelastbarkeit von 1,5 A dimensioniert wurde.

Zusammenfassend muss angemerkt werden, dass die gegenüber gestellten Werte durchaus vergleichbar sind. Um längere Laufzeiten des RP6 Modells bei höherer Auslastung zu erreichen, muss die Akkukapazität dementsprechend angepasst werden. Wobei erwähnt werden sollte, dass im Modellbau eine maximale Akkukapazität der Mignonzelle von 2700 mAh erhältlich ist.

Die Tabellen (Tabelle 12, Tabelle 13) stellen den Vergleich zwischen Hybridstapler und Hybridmodell dar. Für die Berechnung der folgenden Formeln sind aus der Tabelle 7 und Tabelle 8 die Daten übernommen worden.

$$\text{Hybridstapler Stunden Dezimal} = \frac{\text{Hybridstapler Tankvolumen}}{\text{Hybridstapler Kraftstoffverbrauch}}$$

$$\text{Hybridstapler Fahrdauer in min} = \text{Hybridstapler Stunden Dezimal} * 60$$

$$\begin{aligned} \text{Hybridmodell Energieverbrauch} \\ = \text{Hybridmodell Spannung} * \text{Hybridmodell Stromverbrauch} \end{aligned}$$

$$\text{Hybridmodell Stunden Dezimal} = \frac{\text{Hybridmodell Fahrdauer}}{60}$$

$$\text{Hybridmodell Kraftstoffverbrauch} = \frac{\text{Hybridmodell Tankvolumen}}{\text{Hybridmodell Stunden Dezimal}}$$

	Fahrdauer (h:min)
Auslastung Hybridstapler	7:25

Tabelle 12: Ergebnisse des Hybridstaplers RX70-35

	Kraftstoffverbrauch (ml/h)	Energieverbrauch (mW)
Auswertung Hybridmodell	395	3412

Tabelle 13: Ergebnisse des Hybridmodells

Bei der Betrachtung des Gewichtsverhältnisses zwischen Elektro- und Hybridausführung stellte man die ersten Abweichungen fest. Der Hybridstapler ist um 974 kg leichter und erzielte eine knappe 15 prozentige, längere Fahrdauer als der Elektrostapler. Hingegen wurde das Hybridmodell um 1044 g schwerer als das Elektromodell. Ebenfalls nachteilig

ist die zu kurze Laufzeit des Hybridmodells. Eine enorme Abweichung gibt es auch bei den Nenndrehzahlen, die beim Hybridstapler 2600 U/min und beim Hybridmodell 21000 U/min betragen.

Die höhere Drehzahl des Hybridmodells führte zu einer enormen Hitzeentwicklung, die ebenfalls extreme Wärmeverluste herbeiführte. Um den Nitromotor nicht zu überhitzen wurde provisorisch ein Standventilator aufgestellt.

Nachdem beim modifizierten Hybridmodell keine Fahrdauertests durchgeführt werden konnten, ist die aus der Tabelle 14 angeführte Fahrdauer nach folgenden Formeln theoretisch hochgerechnet worden. Der Strombedarf wurde unter Berücksichtigung der Mikrocontroller Erweiterung und durch den erhöhten Motorstrom, der sich wegen der hohen Gewichtsbelastung ergeben würde, theoretisch angenommen. Für die Berechnung des Energiebedarfs sind aus der Tabelle 7 und Tabelle 9 die Daten übernommen worden.

$$\text{Mod.V. Hybrid Stunden Dezimal} = \frac{\text{Elektromodell Akkukapazität}}{\text{Mod.V. Hybrid Strombedarf}}$$

$$\text{Mod.V. Hybrid Fahrdauer in min} = \text{Stunden Dezimal} * 60$$

$$\begin{aligned} \text{Mod.V. Hybrid Energiebedarf} \\ = \text{Mod.V. Hybrid } E - \text{Motor Spannung} * \text{Mod.V. Hybrid Strombedarf} \end{aligned}$$

	Energiebedarf (mW)	Fahrdauer (h:min)
Theoretische Auswertung Mod. V. Hybrid	3672	4:54

Tabelle 14: Theoretische Ergebnisse der mod. Version des Hybridmodells im Normalbetrieb

Für den darauf folgenden VM-Betrieb wurde als Basis ein Strombedarf von 5 A angenommen, der sich aus der 4 A ausgelegten NiMH Laderegler-schaltung, der Mikrocontrollererweiterung und der Motorstromerhöhung durch die Gewichtsmehrbelastung des Fahrzeuges (510 mA), und der zusätzlich verwendeten Elektronikkomponenten, die im VM-Betrieb für die Versorgung und Steuerung der anderen Schaltungen (490 mA) notwendig sind, zusammensetzt. Somit wurden der Kraftstoffverbrauch, Energiebedarf und die Fahrdauer in der Tabelle 15 nach folgenden Formeln theoretisch berechnet.

$$\text{Mod.V. Hybrid Energiebedarf} = \text{Elektromodell Spannung} * \text{Mod.V. Hybrid Strombedarf}$$

$$\text{Mod.V. Hybrid Stunden Dezimal} = \frac{\text{Hybridmodell Stunden Dezimal}}{\left(\frac{\text{Mod.V. Hybrid Energiebedarf}}{\text{Hybridmodell Energieverbrauch}} \right)}$$

$$\text{Mod. V. Hybrid Fahrdauer in min} = \text{Mod. V. Hybrid Stunden Dezimal} * 60$$

$$\text{Mod. V. Hybrid Kraftstoffverbrauch} = \frac{\text{Hybridmodell Tankvolumen}}{\text{Mod. V. Hybrid Stunden Dezimal}}$$

	Energiebedarf (mW)	Fahrdauer (h:min)	Kraftstoffverbrauch (ml/h)
Theoretische Auswertung Mod. V. Hybrid	60000	0:01	6941

Tabelle 15: Theoretische Ergebnisse der mod. Version des Hybridmodells im VM-Betrieb

Bei der Annahme einer prinzipiellen Funktionstüchtigkeit des modifizierten Hybriden und der weiteren Betrachtung der Tabellen (Tabelle 14, Tabelle 15), ergibt sich ein nicht umsetzbares Konzept im Modellbau. Die zusätzlichen Elektronik-Komponenten verursachen einen erhöhten Energieverbrauch, der die Laufzeit des Modells aus Tabelle 14 verringert. Die dramatische Verkürzung der Fahrdauer aus Tabelle 15 verhindert einen Schnellladevorgang.

Bei der Betrachtung des Gewichtsverhältnisses zwischen dem Hybrid (1786 g) und der modifizierten Hybridversion (3372 g) wurde eine nochmalige Gewichtsteigerung von 89 % festgestellt. Diese Gewichtserhöhung steht in keinem Verhältnis zum Ausgangsmodell.

Nach der Schnellladung des NiMH Akkus über den Laderegler und der Feststellung von deren Laufzeit (siehe Abbildung 57) am Elektromodell, ermittelte man die theoretische Akkukapazität (siehe Tabelle 16). Für die Berechnung der folgenden Formeln sind aus der Tabelle 7 und Tabelle 8 die Daten übernommen worden.

$$\begin{aligned} \text{Elektromodell Energieverbrauch} \\ = \text{Elektromodell Spannung} * \text{Elektromodell Stromverbrauch} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Theor. Elektromodell Akkukapazität} \\ = \left(\frac{\text{Elektromodell Akkukapazität}}{\left(\frac{\text{Elektromodell Fahrdauer nach der Ladung mit dem Laderegler}}{\text{Elektromodell Fahrdauer}} \right)} \right) \end{aligned}$$

	Theor. Akkukapazität (mAh)	Energieverbrauch (mW)
Theoretische Auswertung Elektromodell	883	2298

Tabelle 16: Theor. Ergebnisse des Elektromodells RP6 bei einer Schnellladung

Als Gegenüberstellung zur Tabelle 14 wurde auf Basis der theoretisch ermittelten Akkukapazität aus Tabelle 16 der Normalbetrieb der modifizierten Version in Tabelle 17 eingetragen. Für die Berechnung der folgenden Formeln sind aus der Tabelle 7, Tabelle 8 und Tabelle 9 die Daten übernommen worden.

$$\text{Theor. Elektromodell Akkukapazität} = \frac{\text{Elektromodell Akkukapazität}}{\left(\frac{\text{Elektromodell Fahrdauer nach der Ladung mit dem Laderegler}}{\text{Elektromodell Fahrdauer}} \right)}$$

$$\text{Mod. V. Hybrid Energieverbrauch} = \text{Elektromodell Spannung} * \text{Mod. V. Hybrid Strombedarf}$$

$$\text{Mod. V. Hybrid Stunden Dezimal} = \frac{\text{Theor. Elektromodell Akkukapazität}}{\text{Mod. V. Hybrid Strombedarf}}$$

$$\text{Mod. V. Hybrid Fahrdauer in min} = \text{Stunden Dezimal} * 60$$

	Theor. Akkukapazität (mAh)	Energiebedarf (mW)	Fahrdauer (h:min)
Theoretische Auswertung Mod. V. Hybrid	883	3672	1:44

Tabelle 17: Theor. Ergebnisse der mod. Version des Hybridmodells bei einer Schnellladung

Nachdem die niedrigste Akkukapazität auf Basis der Schnellladung über den Laderegler von 17 Minuten und des anschließenden Elektromodell Laufzeittests von 2 Stunden 46 Minuten in der Tabelle 16 theoretisch berechnet wurde, musste bei der modifizierten Hybridversion durch den Zusatz einer Mikrocontrollererweiterung und der Motorstromerhöhung durch die Gewichtsmehrbelastung des Fahrzeuges ein Strombedarf von 510 mA

angenommen werden. Dadurch ergab sich eine minimale Fahrdauer von 1 Stunde und 44 Minuten. Die in der Tabelle 14 eingetragene Fahrdauer von 4 Stunden 54 Minuten errechnete sich aus der vollen Akkukapazität von 2500 mAh. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass die modifizierte Version des Hybriden im Normalbetrieb bei Verwendung der gleichen Starteinstellungen des Elektromodells die Laufzeit des Fahrzeuges zwischen 1 Stunde 44 Minuten und 4 Stunden 54 Minuten liegen wird. Sobald der modifizierte Hybrid vom Normalbetrieb in den VM-Betrieb wechselt wird das Modellbaukonzept durch die Fahrdauer von 1 Minute unbrauchbar, da ein nochmaliges Aufladen des NiMH Akkus nicht mehr möglich ist.

7.1 Nutzungsmöglichkeiten

Im Automobilbereich sind einige Überlegungen des hier vorgestellten Konzeptes bereits im Einsatz. Ein Beispiel dafür ist der Mitsubishi Outlander PHEV, der in drei unterschiedlichen Modi betrieben werden kann. Ein Modus ist dem vorgestellten Konzept sehr ähnlich und funktioniert wie folgt:

„Der serielle Hybridmodus nutzt den Verbrennungsmotor des Fahrzeugs, um den Akku aufzuladen. In diesen Modus schaltet das Auto automatisch, wenn der Ladestand des Akkus unter ein bestimmtes Niveau fällt. Im parallelen Hybridmodus wird vornehmlich die Kraft des Benzinmotors genutzt, die auf die Räder übertragen wird.“ (Gizmodo.de, 2012)

7.2 Weiterentwicklungsmöglichkeiten

Der Modellbau ist für die Nachkonstruktion eines Hybriden wegen der Komponenten Nitrator, Kupplung, Gleichstrommotor, dem Gewicht und der Sperrigkeit der Bauteile, die im Verhältnis zum Fahrzeug relativ groß ausfallen, ungeeignet.

Die im Hybridstapler verbaute Drehstrom-Synchronmaschine hat gegenüber dem im Hybridmodell getesteten Gleichstrommotor einen wesentlichen Vorteil. Der Synchronmotor besitzt keinen Kommutator. Dadurch entfällt der Verschleiß der Bürsten und der Wirkungsgrad steigt. Weiteres betreibt der Dieselmotor den Generator mit einer weit geringeren Drehzahl als beim Modellbau-Pendant. Erkennbar ist das an den unterschiedlichen Nenndrehzahlen. Somit ist eine derartige Hitzeentwicklung auszuschließen. Welche Kupplungsart beim Hybridstapler derzeit im Einsatz ist, wurde von der Firma Still nicht bekannt gegeben. Je nach Kupplungsart können sich verschiedene Antriebsarten ergeben. Der derzeit eingesetzte indirekte Antrieb treibt den Dieselmotor über einen Anlasser an. Beim Einsatz eines Direktantriebes muss die Kupplung dementsprechend ausgelegt werden. Beispielsweise ist ein Einsatz von Fliehkraftkupplungen unvorstellbar, da nur eine Seite der Kupplung die Auslenkung der Klappen beziehungsweise der Schieber beeinflussen kann. Außerdem muss beim Direktantrieb darauf geachtet werden, dass für die Ansteuerung des Generators ein Frequenzumrichter oder Leistungselektronik mit phasenverschobener Ansteuerung verwendet wird. Das Gewicht und die Sperrigkeit der Bauteile

sind beim Hybridstapler kein Problem. Die meisten Komponenten sind derzeit im Hybridstapler verbaut, die Abänderung der Leistungselektronik ist im Gegensatz zum modifizierten Hybridmodell kein ernstzunehmendes Problem. Ebenfalls kann darüber nachgedacht werden, ob sich der Kostenaufwand durch das Ersetzen des Blei-Säure Akkus, wie beispielsweise eines NiMH Akkus oder einer Lithium-Ionen Batterie lohnt.

Aufgrund der in Betrieb genannten Teilfunktionen wäre es durchaus denkbar, das modifizierte Hybridkonzept in die Realität umzusetzen.

Um eine definitive Aussage über die Effizienz der modifizierten Version des Hybriden in der Staplertechnologie zu tätigen, müsste die nächste Entwicklung mit anschließender Untersuchung direkt am Stapler durchgeführt werden.

Index

Boost 20, 24, 27

Rekuperation 9, 21

Literatur

Amtliche Veröffentlichungen:

- BMVIT 2011 Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie: Verkehr in Zahlen - Ausgabe 2011. - Wien: Herry Consult GmbH, 2012
- FVMI 2011 Fachverband der Mineralölindustrie Österreichs: Mineralölbericht 2011. - Wien: Dr. Christoph Capek, 2012
- BMWi, 2009 Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Stand und Entwicklungspotenzial der Speichertechniken für Elektroenergie – Ableitung von Anforderungen an und Auswirkungen auf die Investitionsgüterindustrie. - Florian Hannig, Tom Smolinka (Fraunhofer ISE); Peter Bretschneider, Steffen Nicolai (Fraunhofer AST); Sven Krüger, Frank Meißner, Marco Voigt (VKPartner), 2009
- UBA, 2007 Umweltbundesamt: Zukunftsmarkt Hybride Antriebstechnik. – Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2007

Monografien:

- K. Mollenhauer,
H. Tschöke
2007 Klaus Mollenhauer, Helmut Tschöke: Handbuch Dieselmotoren. - 3.Aufl. - Berlin: Springer, 2007
- K. Reif, 2010 Konrad Reif (Hrsg.): Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe mit Brennstoffzellen und alternativen Kraftstoffen. - 1.Aufl. - Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010
- K. Reif, 2010 Konrad Reif (Hrsg.): Dieselmotor-Management im Überblick einschließlich Abgastechnik. - 1.Aufl. - Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010
- R. Bosch
GmbH, 2004 Robert Bosch GmbH: Dieselmotor-Management - Systeme und Komponenten mit Partikelfilter. - 4.Aufl. - Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn, 2004
- H.-H. Braess,
U. Seiffert, 2007 Hans-Hermann Braess, Ulrich Seiffert (Hrsg.): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. - 5.Aufl. - Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2007
- R. Bosch
GmbH, 2005 Robert Bosch GmbH: Ottomotor-Management - Systeme und Komponenten. - 3.Aufl. - Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2005
- C. Stan, 2008 Cornel Stan: Alternative Antriebe für Automobile - Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger. - 2.Aufl. - Heidelberg: Springer, 2008
- P. Hofmann,
2010 Peter Hofmann: Hybridfahrzeuge – Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft. – Wien: Springer, 2010

- H. Wallentowitz,
A. Freialden-
hoven, 2011 Henning Wallentowitz, Arndt Freialdenhoven: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges – Technologien, Märkte und Implikationen. – 2.Aufl. - Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011

Quellen aus dem Internet:

- Hybrid-Autos.Info, 2013 Uli Christian Blessing <Uli.Blessing@Hybrid-Autos.info>: Hybrid-Fahrzeuge. URL: <<http://www.hybrid-autos.info/Hybrid-Fahrzeuge/>>, verfügbar am 26.01.2013
- Welt.de, 2009 Reinhold Schnupp <Reinhold.Schnupp@AxelSpringer.de>: Dieser Hybrid-Porsche kann segeln. URL: <<http://www.welt.de/motor/article3256117/Dieser-Hybrid-Porsche-kann-segeln.html>>, verfügbar am 29.01.2013
- Graupner.de, 2013 Graupner GmbH & Co. KG <info@graupner.de>: Speed 600 BB Turbo 12 V. URL: <<http://www.graupner.de/de/products/5c5b118e-afc6-4ee2-b03a-c3f2e91947c1/3302/product.aspx>>, verfügbar am 16.02.2013
- Conrad, 2013 Conrad Electronic SE <webmaster@conrad.de>: RC Motor einstellen leicht gemacht. URL: <http://www.conrad.de/ce/de/content/ti_motor_einstellen/Motor-einstellen-leicht-gemacht>, verfügbar am 08.03.2013
- Gizmodo.de, 2012 Andreas Donath: Mitsubishi Outlander PHEV – das SUV mit Steckdose. URL: <<http://www.gizmodo.de/2012/09/10/mitsubishi-outlander-phev-das-suv-mit-steckdose.html>>, verfügbar am 30.05.2013

Bedienungsanleitungen und Datenblätter:

- Still, 2013 STILL Gesellschaft m.b.H.: RX 60 Technische Daten - Elektro-Gabelstapler. – Wiener Neudorf, 2013
- Still, 2013 STILL Gesellschaft m.b.H.: RX 70 Hybrid Technische Daten – Diesel- und Treibgas-Gabelstapler. – Wiener Neudorf, 2013
- Arexx Engineering, 2007 Arexx Engineering: - RP6 Robot System – RP6 Base. - Zwole, 2007

Verwendete Software:

RP6 Remotrol
1.3 Fabian E.: RP6 Remotrol 1.3: Die Opensource RP6-Fernsteuerung.
URL: <<http://www.roboternetz.de/community/threads/47704-RP6-Remotrol-1-3-Die-Opensource-RP6-Fernsteuerung>>, verfügbar am 18.06.2013

AutoCAD 2010 Autodesk GmbH

RP6 Loader
1.2 Arexx Engineering, Conrad Electronic GmbH & Co KG

Programmers
Notepad 2 Arexx Engineering, Conrad Electronic GmbH & Co KG

WinAVR
20070525 Arexx Engineering, Conrad Electronic GmbH & Co KG

C-Control Pro
IDE 2.13.0.15 Arexx Engineering, Conrad Electronic GmbH & Co KG

Eagle Profes-
sional 6.1.0 CadSoft Computer GmbH

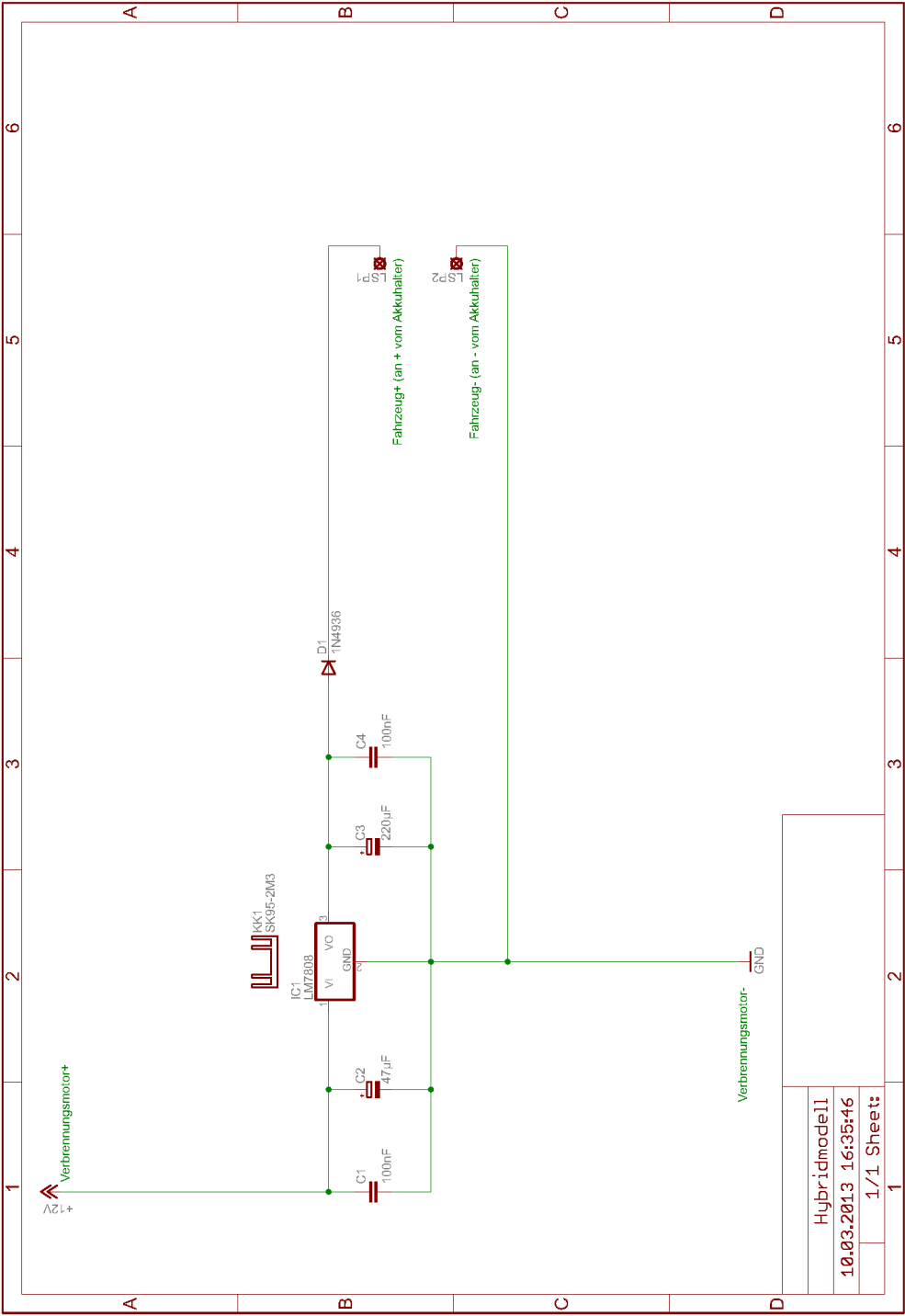
AutoHotkey
110703 Chris Mallett, Steve Gray: AutoHotKey. URL:
<<http://www.autohotkey.com/>>, verfügbar am 18.06.2013

PSpice 9.1 Cadence Design Systems

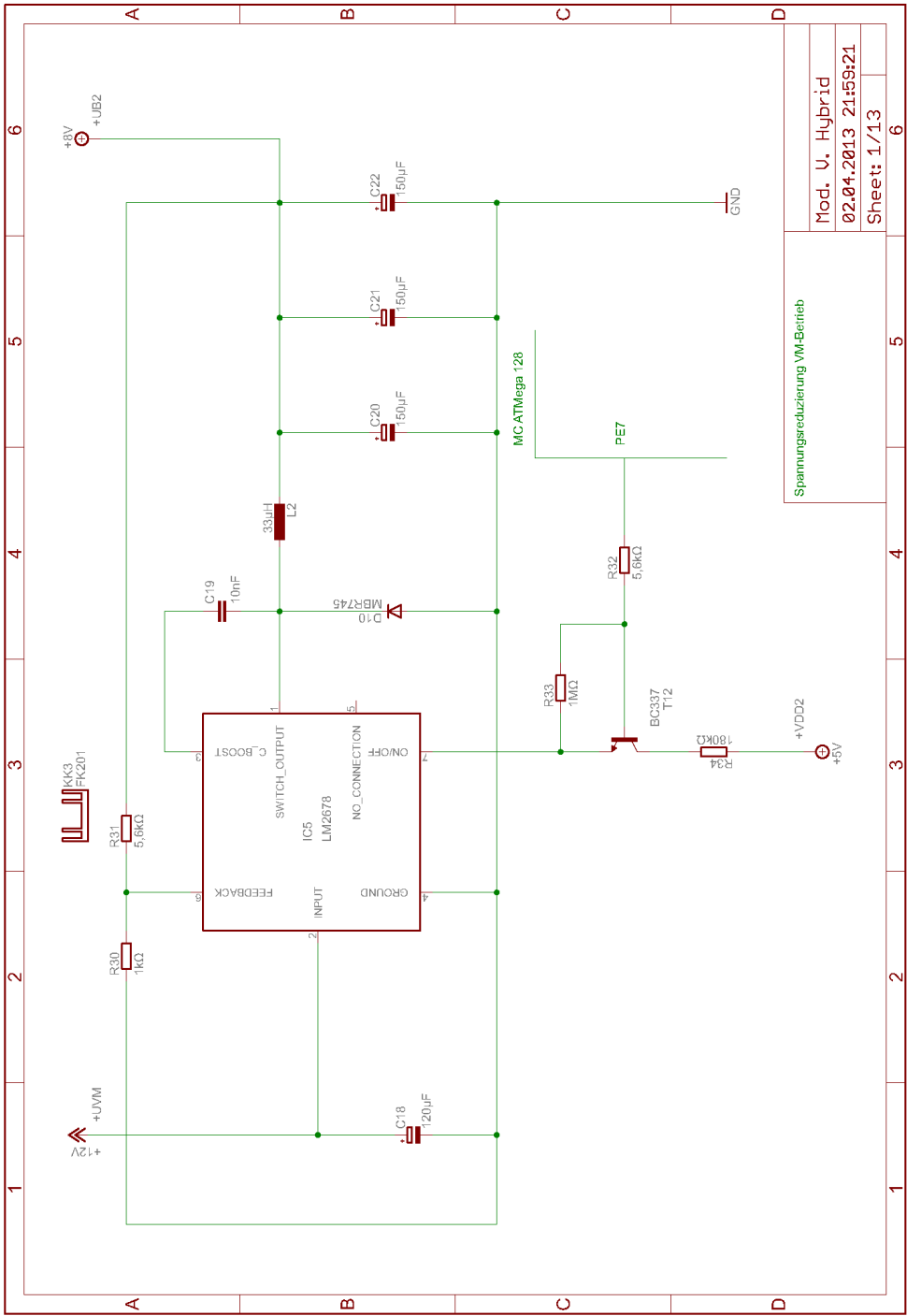
Anlagen

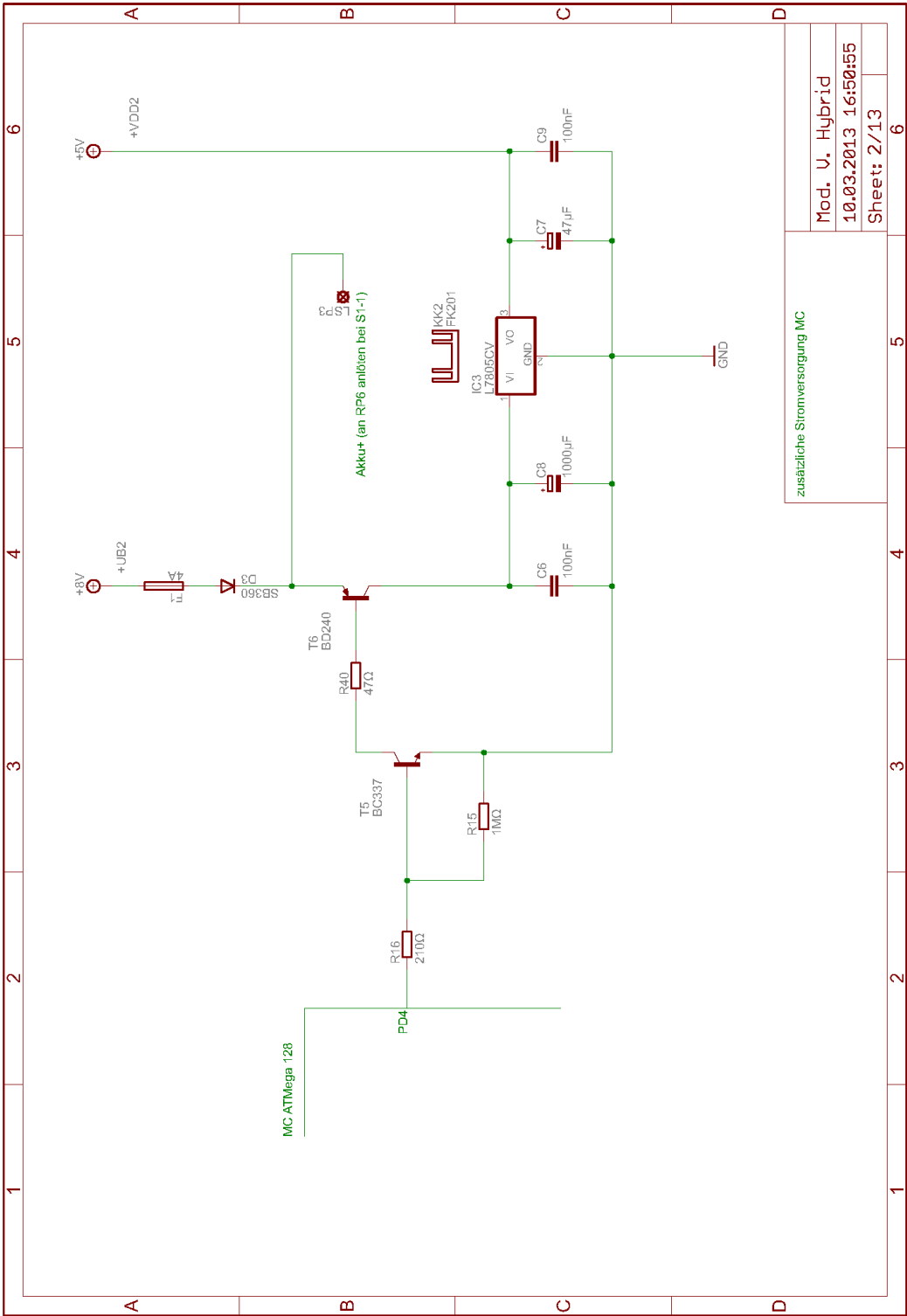
Hybridmodell	A-I
Modifizierte Version des Hybridmodells	A-III

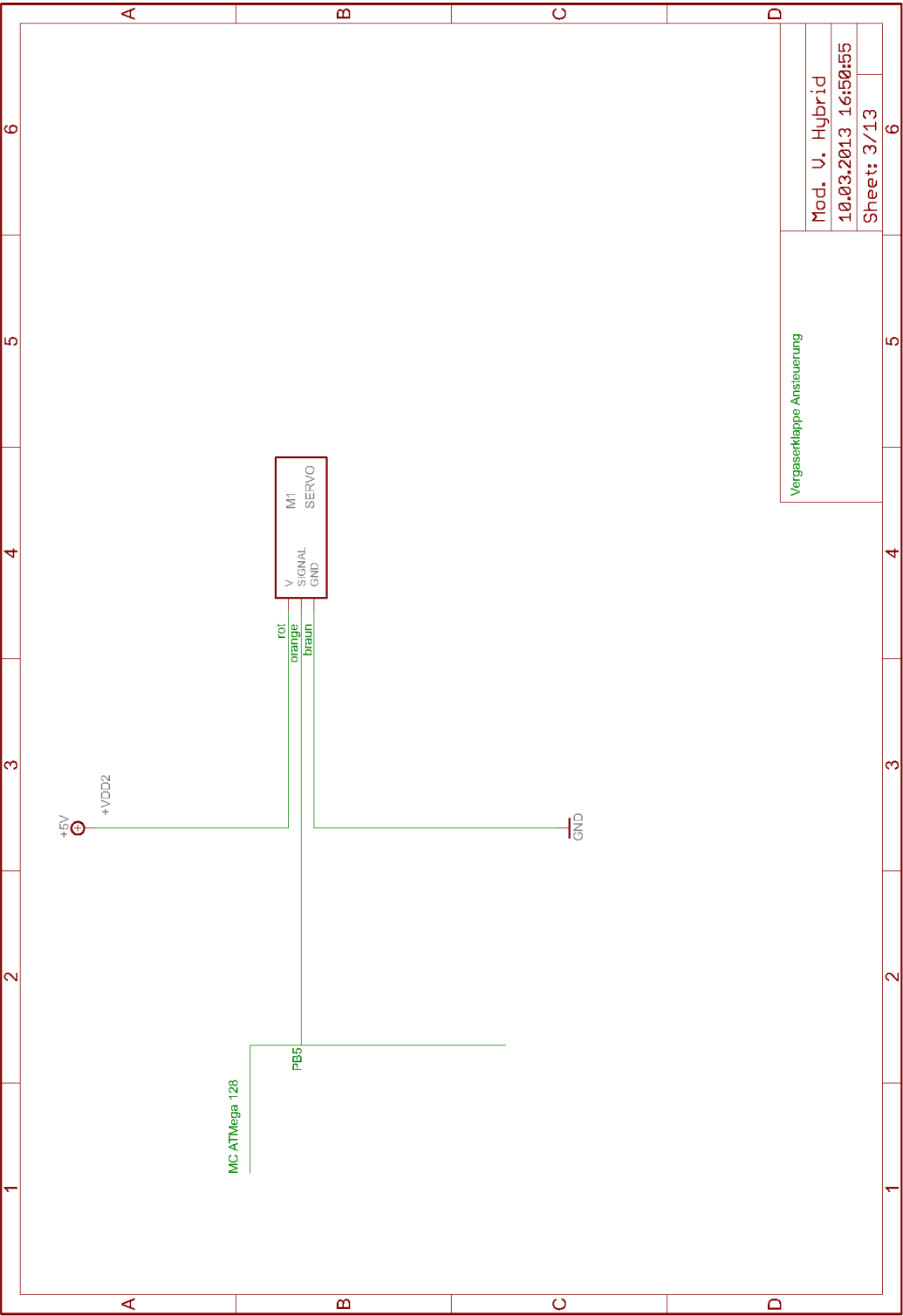
Anlagen, Hybridmodell

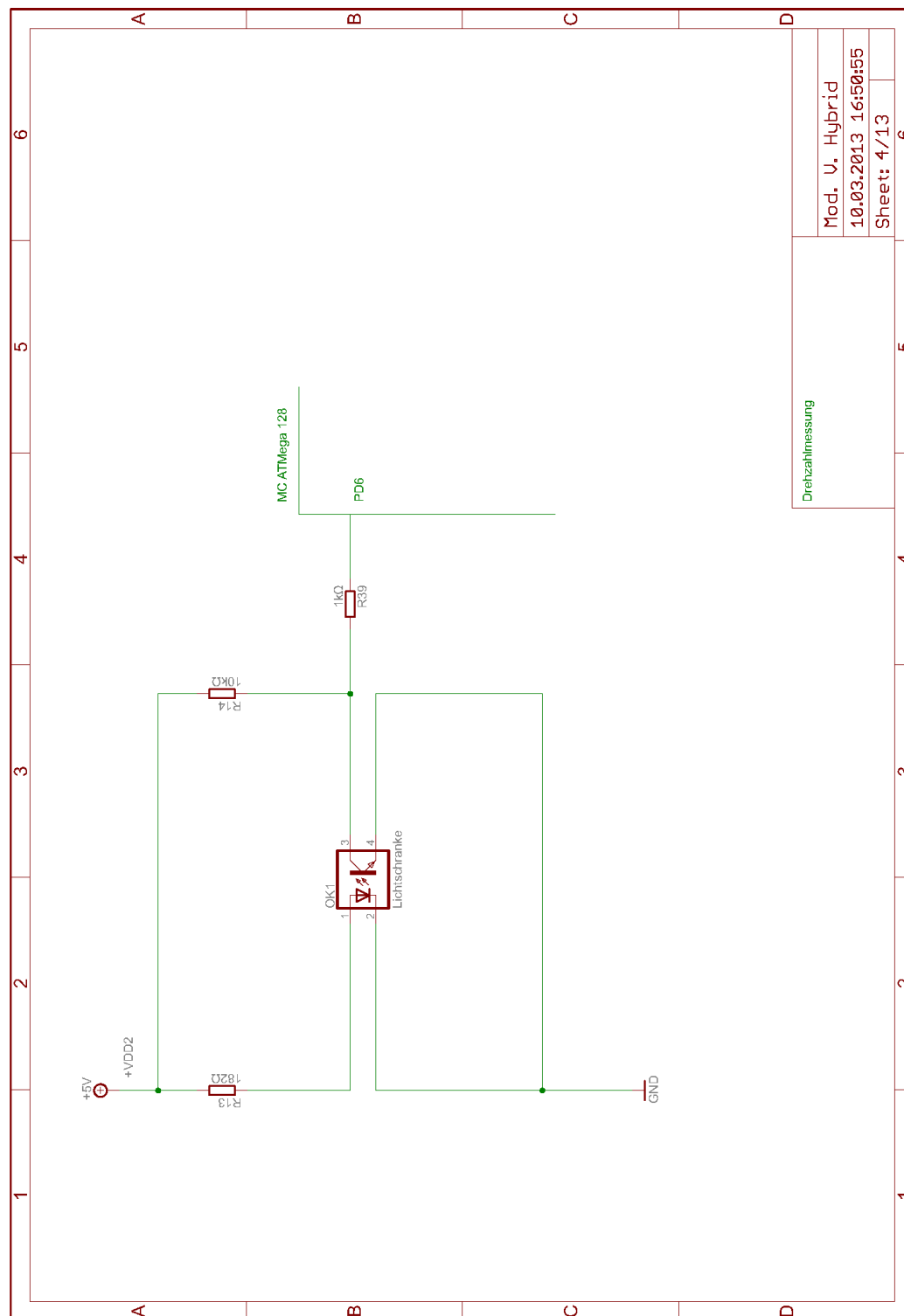


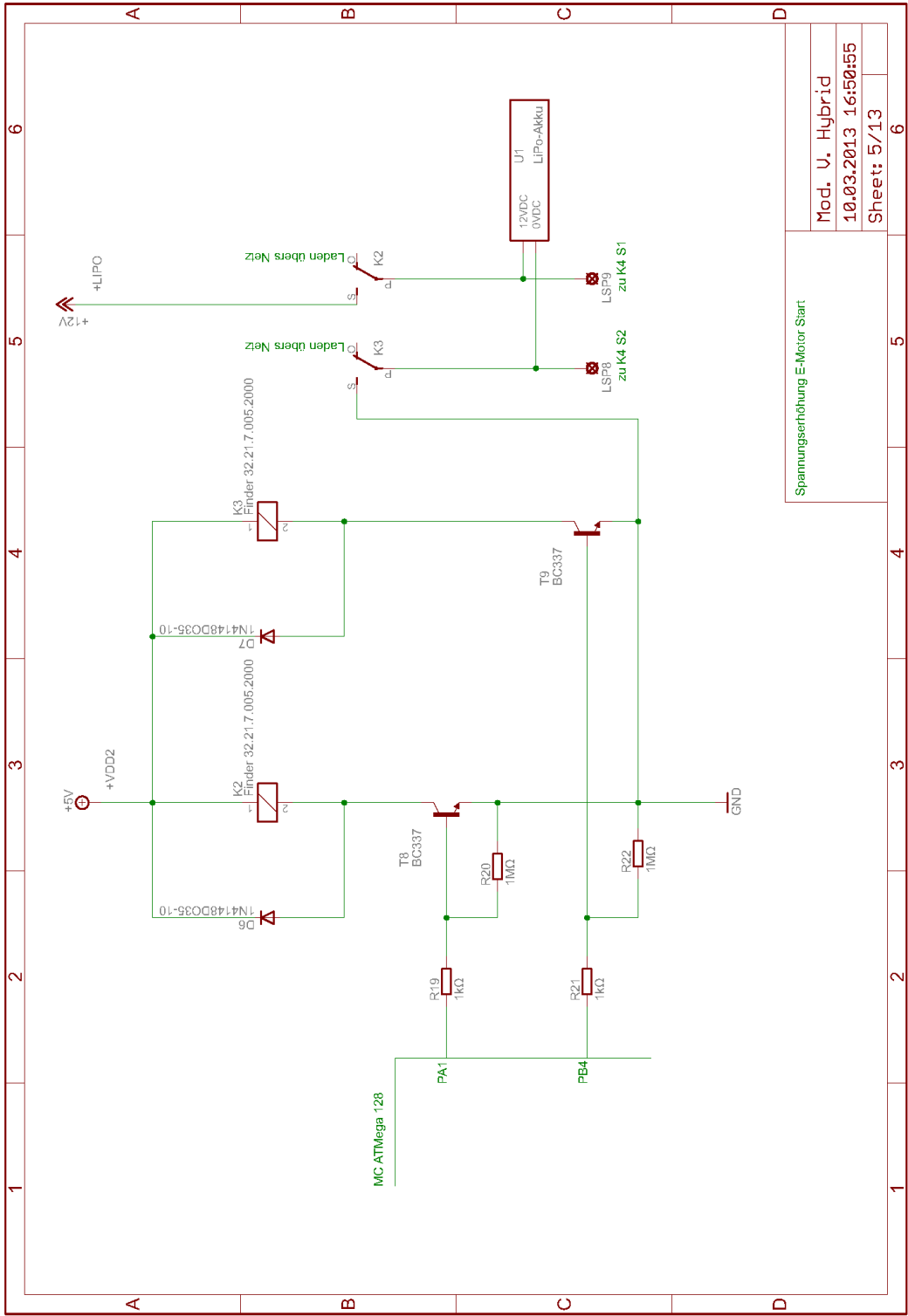
Anlagen, Modifizierte Version des Hybridmodells

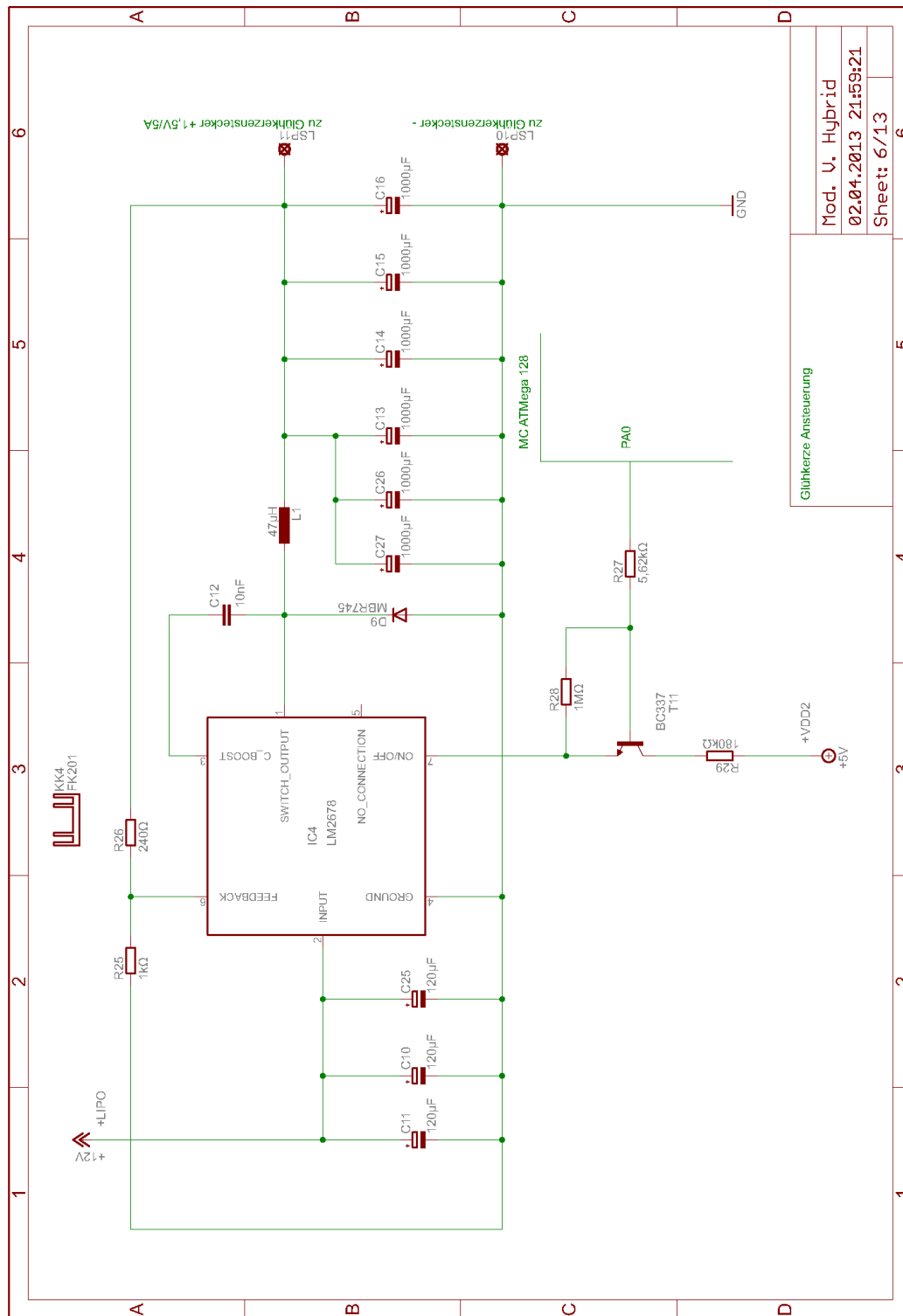


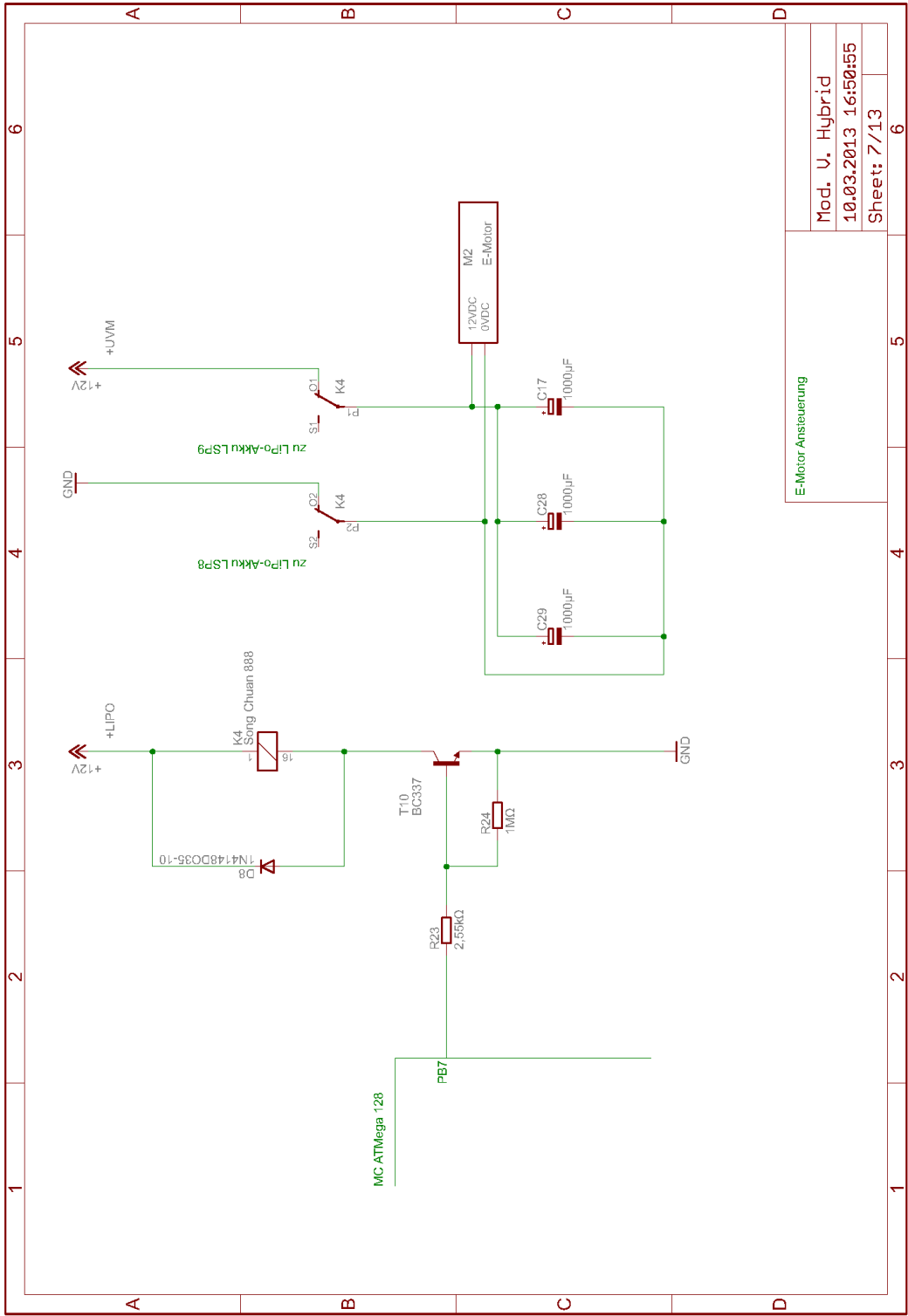






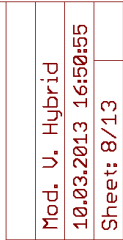


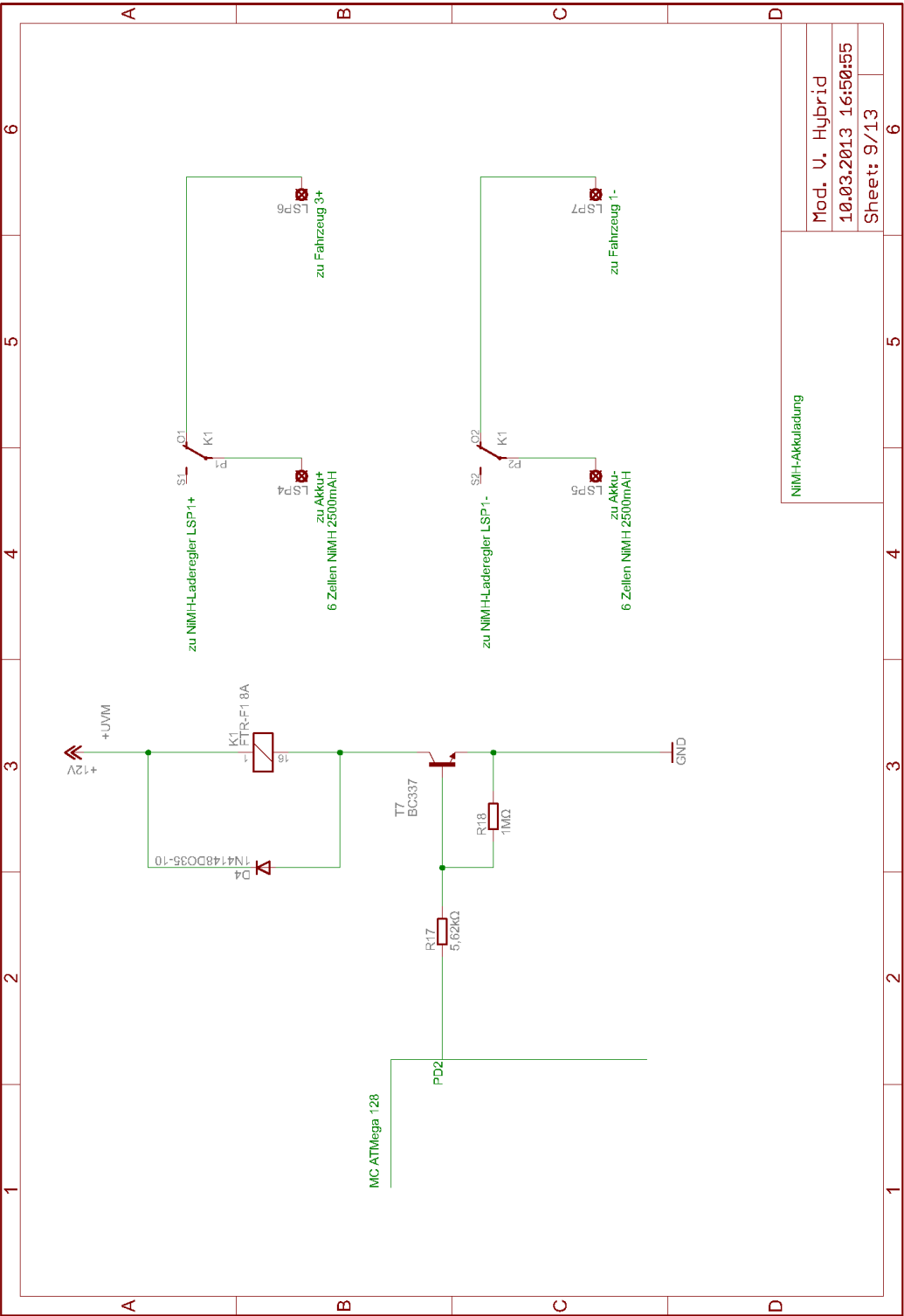


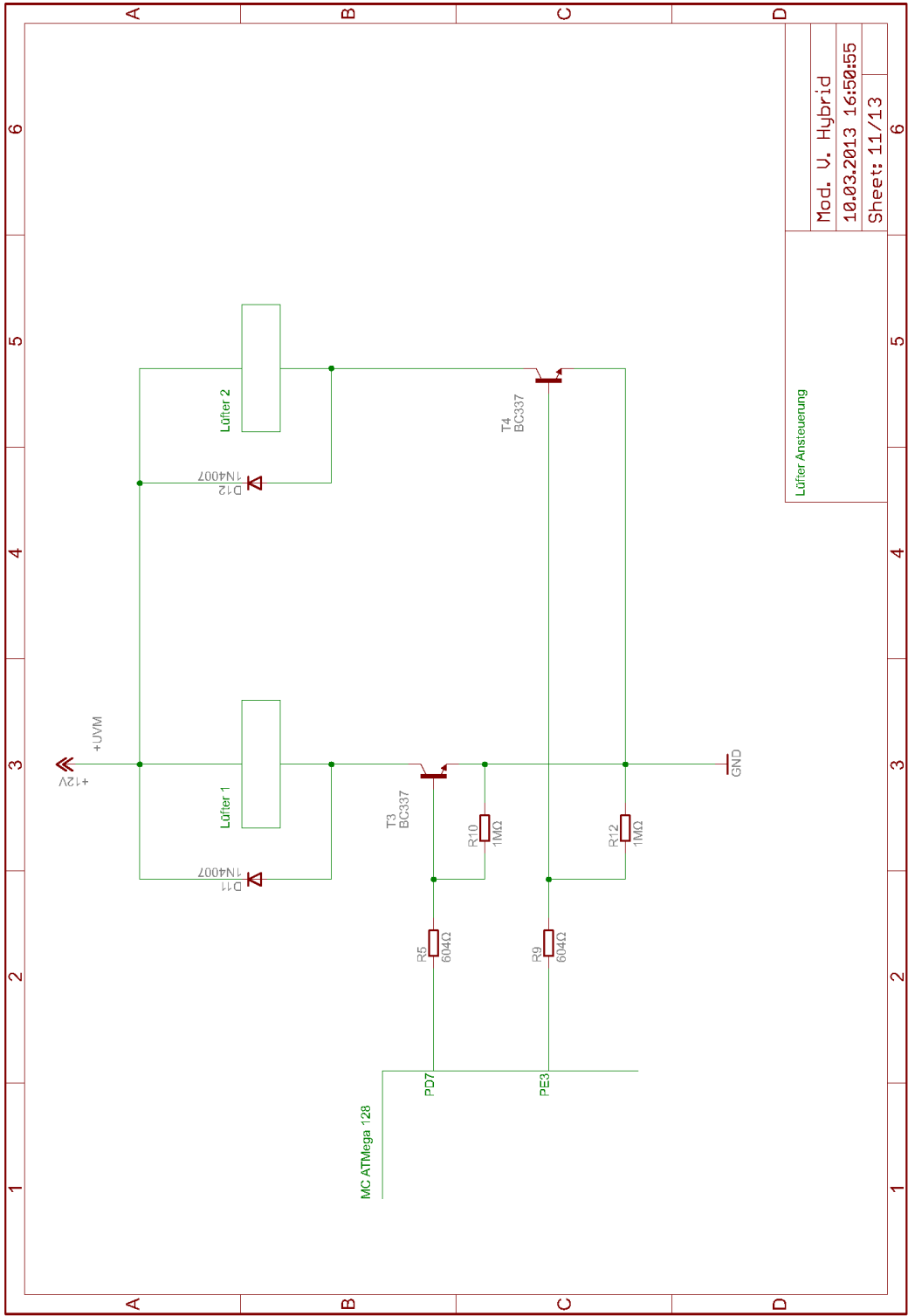


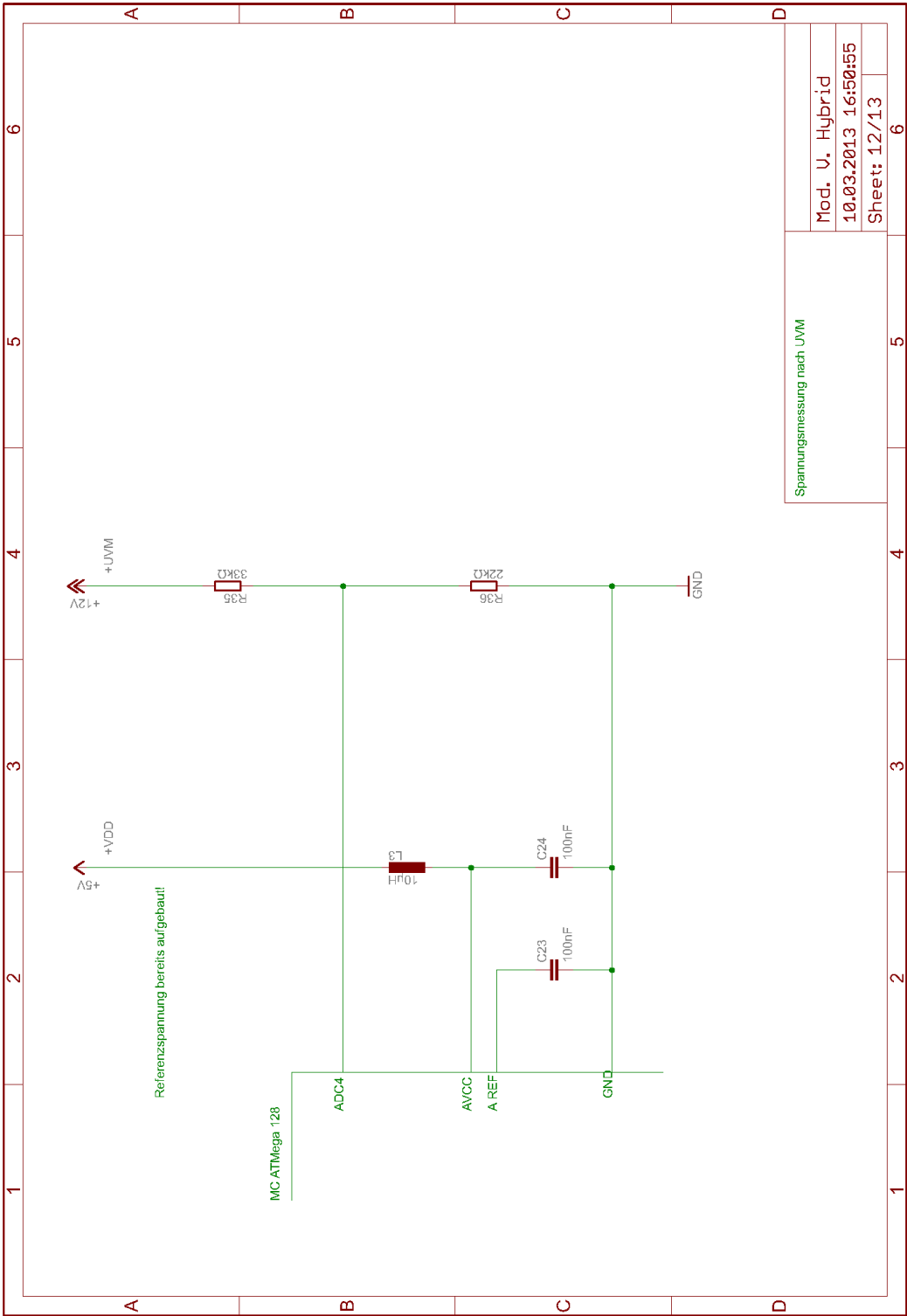
E-Motor Ansteuerung

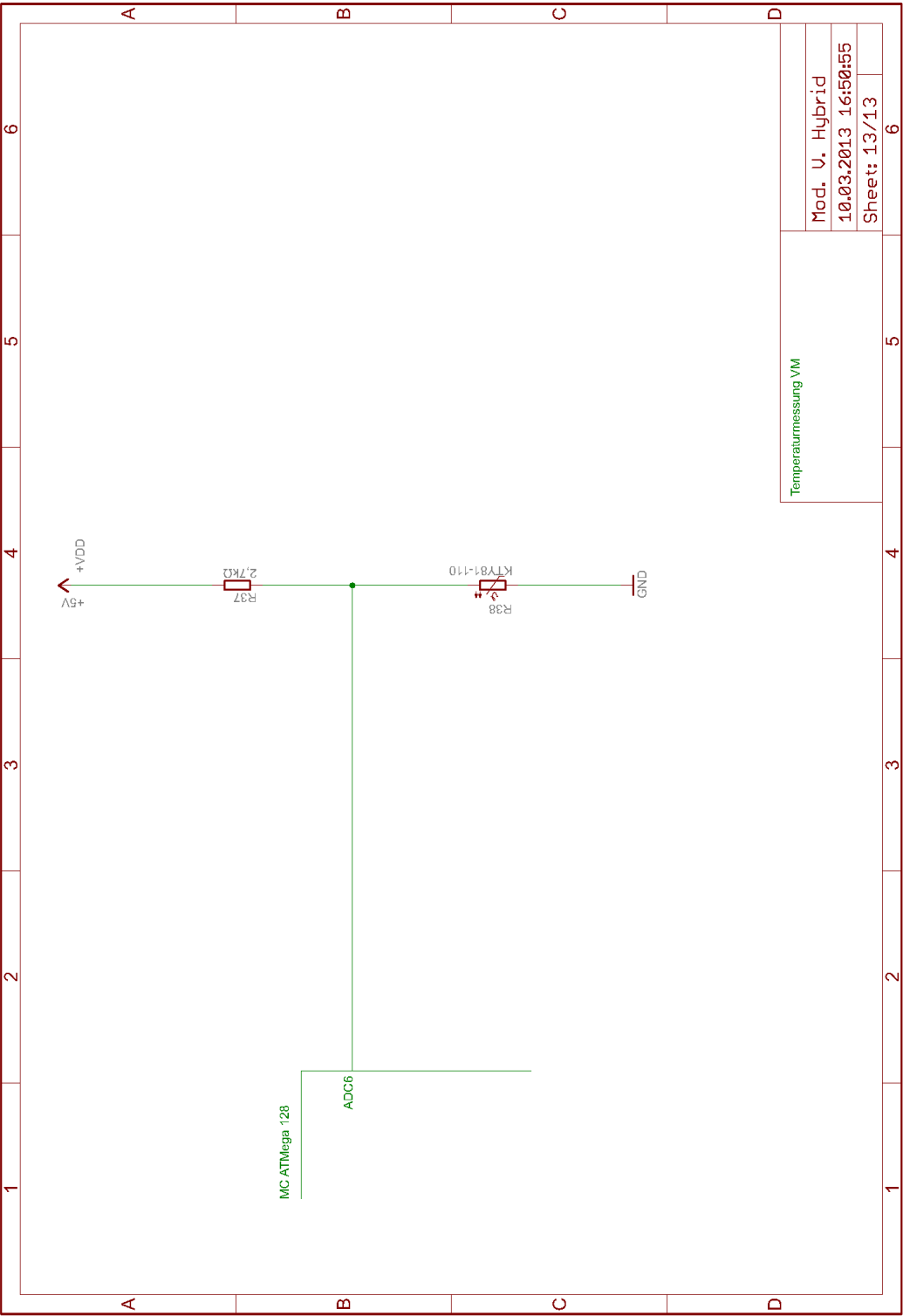
Mod. U. Hybrid
10.03.2013 16:50:55
Sheet: 7/13











```

#include "..\..\Library\RP6M128\RP6CCLib.cc"

// wurde von mir hinzugefügt, da ich übergreifend auf Variablen zugreifen muss
#include "..\..\Library\RP6M128\M128_ServoLib.cc"
#include "..\..\Library\RP6M128\RP6MasterLib.cc"

#ifdef __RP6_REMOTROL__
#define __RP6_REMOTROL__

// Port Konfiguration
#define PORT_PA0 0
#define PORT_PA1 1
#define PORT_PB4 12
#define PORT_PB7 15
#define PORT_PD2 26
#define PORT_PD3 27
#define PORT_PD4 28
#define PORT_PD6 30
#define PORT_PD7 31
#define PORT_PE3 35
#define PORT_PE7 39

// Konstanten deklarieren
int SPG_NIEDRIG;

// Variablen deklarieren
int zsv;
word drz;
word tmpmess;
word spgmess;

void main(void)
{
    RP6_CCPR0_Init();
    showScreenLCD("RP6 Remotrol", "Diamondback");
    AbsDelay(2000);
    clearLCD();
    initPCConnection();

    // Beginn meines Codes

    // Initialisieren
    zsv=0;
    // ADC Wert 700 entspricht in etwa 7 Volt
    SPG_NIEDRIG=700;
    initServos();
    task_Servos();

    // Portrichtung konfigurieren
    Port_DataDirBit(PORT_PD4, PORT_OUT);
    Port_DataDirBit(PORT_PA1, PORT_OUT);
    Port_DataDirBit(PORT_PB4, PORT_OUT);
    Port_DataDirBit(PORT_PA0, PORT_OUT);
    Port_DataDirBit(PORT_PB7, PORT_OUT);
    Port_DataDirBit(PORT_PD7, PORT_OUT);
    Port_DataDirBit(PORT_PE3, PORT_OUT);
    Port_DataDirBit(PORT_PE7, PORT_OUT);

    while(true)
    {
        // keine Timer, da sonst die PCConnection nicht mehr funktioniert!

        // Achtung!!!! Servoeinstellung in der M128_PCConnection.cc auskommentiert
        taskPCConnection();

        // wird eigentlich schon im M128_PCConnection.cc aufgerufen, falls Verbindung
        abbricht kann es eventuell nicht mehr aufgerufen werden, deshalb nochmals aufrufen
        getAllSensors();

        // Akkuzustand ausgeben
        print("Bat:");
        printInteger(adcBat);
        print("\n");
        newline();
    }
}

```

```

// wenn die NimH-Akkuspannung niedriger als SPG_NIEDRIG ist -> Schleife ausführen
if (adcBat < SPG_NIEDRIG)
{
    // VM-Start Ablauf hier eintragen, derzeit LED Toogle Test
    Port_WriteBit(PORT_LED1, PORT_ON);
    Port_WriteBit(PORT_LED2, PORT_OFF);
    AbsDelay(1000);
    Port_WriteBit(PORT_LED1, PORT_OFF);
    Port_WriteBit(PORT_LED2, PORT_ON);
    AbsDelay(1000);
}

// Drehzahlmessung testen - Weiterverarbeitung erforderlich!
Timer_TlCNT();
drz=Timer_TlGetCNT();
print("Drehzahl:");
printInteger(drz);
print("Test");
newline();

// Temperaturmessung VM testen
// -55°C = ADC-Wert 157
// -40°C = ADC-Wert 177
// -20°C = ADC-Wert 206
// 0°C = ADC-Wert 237
// +20°C = ADC-Wert 268
// +40°C = ADC-Wert 300
// +100°C = ADC-Wert 395
// +120°C = ADC-Wert 425
// +140°C = ADC-Wert 450
// +150°C = ADC-Wert 461
ADC_Set(ADC_VREF_VCC, 6);
tmpmess=ADC_Read();
print("Temp:");
printInteger(tmpmess);
print("Test");
newline();

// Spannungsmessung nach VM testen
ADC_Set(ADC_VREF_VCC, 4);
spgmess=ADC_Read();
print("Spg:");
printInteger(spgmess);
print("Test");
newline();

// Timerersatz -> zsv Variable
// zusätzliche Stromversorgung einschalten (PD4)
Port_WriteBit(PORT_PD4, PORT_OFF);
zsv++;

if (zsv > 50)
{
    // zum Testen werden derzeit Timer eingesetzt, da PC Verbindung nicht notwendig
    // Vergaserklappe auf Standgas stellen
    Servo_Set(SERVO1, 900);
    AbsDelay(1000);

    // Spannungsfreigabe LiPo Akku einschalten (PA1 + PB4)
    Port_WriteBit(PORT_PB4, PORT_OFF);
    AbsDelay(1000);
    Port_WriteBit(PORT_PA1, PORT_OFF);
    AbsDelay(2000);

    // Glühkerzenerwärmung einschalten (PA0)
    Port_WriteBit(PORT_PA0, PORT_OFF);
    AbsDelay(5000);

    // E-Motor Ansteuerung einschalten (PB7)
    Port_WriteBit(PORT_PB7, PORT_OFF);

    /* für den Test im VM-Betrieb vorbereitet
    // Lüfter 1 einschalten
    Port_WriteBit(PORT_PD7, PORT_OFF);

```

```
        AbsDelay(2000);

        // Lüfter 2 einschalten
        Port_WriteBit(PORT_PE3, PORT_OFF);
        AbsDelay(2000);

        // Spannungsreduzierung VM-Betrieb
        Port_WriteBit(PORT_PE7, PORT_OFF);
        AbsDelay(2000);
        */
    }
}

#endif
```


Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Klein-Pöchlarn, den 15. Juli 2013

Ing. Manfred Kurt Nußbaumer